

Hieskoivun (*Betula pubescens* Ehrh.) tilavuuden ja biomassan kumulatiiviset mallit

Pauli Kartano
Maisterintutkielma
Helsingin yliopisto
Metsätieteiden maisteriohjelma
Metsien ekologia ja käyttö
Lokakuu 2020

Tiedekunta – Fakultet – Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree Programme Metsätieteiden osasto, metsätieteiden maisteriohjelma	
Tekijä – Författare – Author Pauli Kartano			
Työn nimi – Arbetets titel – Title Hieskoivun (<i>Betula pubescens</i> Ehrh.) tilavuuden ja biomassan kumulatiiviset mallit			
Oppiaine/Opintosuunta – Läroämne/Studieinriktning – Subject/Study track Metsien ekologia ja käyttö			
Työn laji – Arbetets art – Level Maisterintutkielma		Aika – Datum – Month and year Lokakuu 2020	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages 75
<p>Tiivistelmä – Referat – Abstract</p> <p>Hieskoivu (<i>Betula pubescens</i> Ehrh.) on Suomen ylivoimaisesti yleisin puulaji runkoluvun perusteella, sitä on melkein kaksinkertainen määrä toiseksi yleisempää puuhun, mäntyyn (<i>Pinus sylvestris</i>), verrattuna. Hieskoivu ei ole vaateliias kasvupaikoiltaan, vaan se kasvaa sekä kuivilla että märillä paikoilla metsissä, soilla, rannoilla, pientareilla ja hylätyillä pelloilla. Suomessa hieskoivua kasvaa lähes koko maassa aivan pohjoisinta tunturi-Lappia lukuun ottamatta. Hieskoivu on rauduskoivua (<i>Betula pendula</i>) pienempi, lyhytikäisempi ja ulkomuodoltaan vaihtelevampi ja se kasvaa noin 20-metriseksi ja 70–90-vuotiaaksi. Hieskoivu ei ole ollut Suomessa kovinkaan suosittu ja sitä käytetään nykyään pääasiassa energiapuuna ja sitä ei teollisessa käytössä erotella rauduskoivusta.</p> <p>Tutkimuksen tavoitteena oli laatia hieskoivun maanpäälliselle tilavuudelle ja biomassalle kumulatiivinen malli pienellä, 15 puun koepuumäärällä. Koepuista mitattiin manuaalisesti rungon pätkien läpimitat, pätjän pituus ja paino. Oksista mitattiin oksien paino kunkin runkopätjän osalta. Upottamalla rungon pätkestä ja oksista mitattiin tilavuus ja paino. Jokaisesta koepuusta laskettiin suhteellinen runkokäyrä, jonka avulla laskettiin yhteinen runkokäyrä. Rungon ja oksien tilavuuksista muodostettiin erilliset käyrät ja niistä muodostettiin kunkin puun tilavuuskäyrien avulla yhteiset tilavuuskäyrät. Näiden avulla muodostettiin erilaisia koko puun kumulatiivisia tilavuuskäyriä. Tilavuuden lisäksi laskettiin tiheyksiä rungon osille ja oksille ja yhdessä tilavuuskäyrien kanssa niistä voidaan laskea biomassamalli.</p> <p>Lasketut runkokäyrät erosivat Laasasenahon runkokäyristä eniten tyvestä, mutta 10 % suhteellisen korkeuden yläpuolella käyrät käyttäytyivät hyvin samansuuntaisesti. Koko puun tilavuutta laskettiin yhdeksällä eri tavalla ja saatuja tuloksia verrattiin Hoppin ja Repolan kaavoihin sekä mittamalla saatuihin tilavuuksiin. Kaavat, joissa puun pituus oli ainoana selittäjänä tekijänä, antoivat selkeästi vaihtelevampia tuloksia kuin muut, joissa otettiin huomioon myös läpimitta jollain tietyllä korkeudella. Pienimmät suhteelliset keskihajonnat olivat 4,1 %, 4,2 % ja 4,6 % ja tilavuuden keskihajonnat 8,3 l, 7,4 l ja 7,4 l. Nämä kaavat hyödynsivät puun pituutta ja läpimittaa. Vastaavat lukemat Hoppin ja Repolan kaavoilla olivat prosentuaalisen keskihajonnan osalta 5,7 % ja 12,7 % ja tilavuuden keskihajonnan osalta 10,7 l ja 9,4 l. Biomassamallista samanlaista vertailua ei tehty, koska vertailukelpoisia ja luotettavia rungon ja oksien tiheyksiä ei ollut kuin kolmesta koepuusta.</p> <p>Tässä esitetyt mallit poikkeavat aikaisemmin tehdyistä malleista kumulatiivisen lähestymistapansa ansiosta ja vain hieskoivulle tehtyjä malleja on vain Hoppin malli. Kumulatiivinen lähestymistapa mahdollistaa tilavuuden (tai biomassan) laskemisen mille tahansa puun suhteellisen korkeuksien osalle, jota muut jo olemassa olevat mallit eivät tarjoa. Muut mallit antavat tuloksena ulos vain koko puun (tai rungon, riippuu mallista) tilavuuden tai massan.</p> <p>Vertailu muihin malleihin osoittaa, että hyvin rajallisella koepuumäärällä voidaan luoda mallit, jotka toimivat vähintään paikallistasolla hyvin ja Repolan kaavasta saatujen vertailutulosten perusteella myös niiden yleistettävyyden on ainakin kohtuullisella tasolla. Tulokset vahvistivat oletusta, että puiden mittasuhteet käyttäytyvät johdonmukaisesti eri kokoisilla puilla.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Hieskoivu, <i>Betula pubescens</i> , runkokäyrä, tilavuuskäyrä, biomassamalli			
Ohjaaja tai ohjaajat – Handledare – Supervisor or supervisors Jouko Laasasenaho, Juha Rikala			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Helsingin yliopiston kirjasto – Helda / E-thesis (opinnäytteet) ethesis.helsinki.fi			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

Tiedekunta – Fakultet – Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree Programme Department of Forest sciences
Tekijä – Författare – Author Pauli Kartano		
Työn nimi – Arbetets titel – Title Cumulative volume and biomass models for downy birch (<i>Betula pubescens</i> Ehrh.)		
Oppiaine/Opintosuunta – Läroämne/Studieinriktning – Subject/Study track Forest ecology and management		
Työn laji – Arbetets art – Level Master's thesis	Aika – Datum – Month and year October 2020	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages 75
<p>Tiivistelmä – Referat – Abstract</p> <p>Downy birch (<i>Betula pubescens</i> Ehrh.) is by far the most common tree species in Finland when considering stem count. The number of the downy birches are almost double compared to pine (<i>Pinus sylvestris</i>). Downy birch is not very demanding of its surrounding and it grows in both dry and wet places in forests, marshes, shores and abandoned fields. Downy birch grows in all areas in Finland except the northernmost Lapland. Compared to Downy birch silver birch (<i>Betula pendula</i>) is smaller, short-lived and the appearance is more varied. Downy birch can grow up to 20 meters high and 70 to 90 years old. Downy birch has not been exceedingly popular tree in Finland, and it is mostly used as an energy wood. Downy birch and silver birch are not separated in commercial use.</p> <p>The aim for this study was to develop cumulative model for above ground volume and biomass for downy birch with 15 tree sample. Diameter, length and weight were manually measured from each section of the sample tree stems. Weight of branches were measured for every stems section. Volume and weight of each stem section and branches were measured by sinking them into water. Relative taper curves were calculated for each sample tree and with those the general taper curve was calculated.</p> <p>From stem and branch volumes separate volume curves were calculated. General volume curves for were calculated based on the separate curves. With those curves different cumulative whole tree volume curves were created. In addition to volumes, also densities for stem sections and branches were calculated. With those and volume curves biomass model can be calculated</p> <p>Calculated taper curves differed from Laasasenaho's taper curves mostly on the base of the stem but above 10 % relative height the taper curves behaved similarly. Whole tree volumes were calculated with nine different methods and the results were compared to Hoppi's and Repola's equations and measured volumes. Equations where the tree height was the only explanatory factor gave much more varied results than those equations which also took the diameter in consideration. Smallest relative standard deviations were 4,1 %, 4,2 % and 4,6 %. Smallest standard deviations of the volume were 8,3 l, 7,4 l and 7,4 l. These equations used tree height and diameter. Hoppi's and Repola's equations gave relative standard deviations of 5,7 % and 12,7 % and standard deviations of the volume were 10,7 l and 9,4 l, respectively. Similar comparisons were not done with biomass model because reliable results of the branch and stem densities were available only from three sample trees.</p> <p>The equations presented here are different than previous models because of the cumulative nature- Only other downy birch model was Hoppi's model. Cumulative approach makes it possible to calculate volume (or biomass) from any relative height range and previous models do not offer that possibility. Other models give out the volume or the biomass of the whole tree (or stem).</p> <p>Comparison with the other models demonstrates that it is possible to create models that work well at the local level with very few sample trees. Comparisons with Repola's model shows that result can be generalized well. Results verifies the assumption that the proportions of different size trees behave consistently.</p>		
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Downy birch, <i>Betula pubescens</i> , taper curve, volume curve, biomass model		
Ohjaaja tai ohjaajat – Handledare – Supervisor or supervisors Jouko Laasasenaho, Juha Rikala		
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Helsinki University Library – Helda / E-thesis ethesis.helsinki.fi		
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information		

Sisällysluettelo

Kiitokset.....	3
1. JOHDANTO	4
1.1. Hieskoivusta yleisesti	4
1.2. Hieskoivun osuus Suomen metsissä.....	5
1.3. Hieskoivun käytön historia.....	7
1.4. Hieskoivun teollinen käyttö.....	9
1.5. Hieskoivun energiapuukäyttö	11
1.6. Hakkuukoneen keräämät tiedot	13
1.7. Puun mallinnus.....	14
1.8. Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimusongelma	18
2. AINEISTO JA MENETELMÄT	19
2.1. Koepuuaineistot	19
2.2. Manuaaliset mittaukset	22
2.3. Mittalaite.....	26
2.4. Mittalaitteella tehdyt mittaukset.....	27
2.5. Aineiston esikäsittely.....	28
3. TULOKSET	31
3.1. Runkokäyrät kullekin puulle.....	31
3.2. Yhteinen runkokäyrä koepuiden runkokäyristä	34
3.3. Yhteinen runkokäyrä suhteellisen läpimitan perusteella.....	36
3.4. Runkokäyrän laskeminen suhteellisen runkokäyrän avulla	38
3.5. Rungon kumulatiivinen suhteellinen tilavuuskäyrä	39
3.6. Oksien suhteellinen tilavuuskäyrä.....	44
3.7. Koko puun suhteellinen tilavuuskäyrä	47
3.8. Koko puun suhteellinen tilavuus	49
3.9. Tilavuus 20 % korkeudella	50
3.10. Koko puun tilavuuden laskeminen	53
3.11. Tiheyden laskeminen.....	57
3.12. Biomassamallit	58
4. TULOSTEN TARKASTELU	59
4.1. Runkokäyrät	59
4.2. Rungon kumulatiivinen suhteellinen tilavuuskäyrä	61
4.3. Oksien suhteellinen tilavuuskäyrä.....	63

4.4.	Koko puun kumulatiivinen suhteellinen tilavuuskäyrä	63
4.5.	Tilavuus 20 % korkeudella	65
4.6.	Koko puun tilavuus.....	65
4.7.	Tiheydet.....	67
4.8.	Koko puun biomassa	68
4.9.	Virhelähteet.....	68
4.10.	Jatkotutkimustarpeet	69
5.	JOHTOPÄÄTÖKSET	70
6.	LÄHTEET	72
7.	LIITTEET	76

KIITOKSET

Kiitokset Marjatta ja Eino Kollin säätiön Jouko Laasasenaholle tutkimukseen ”haavan ja hieskoivun biomassan mittaus ja mallinnus” myöntämästä apurahasta, josta tämän tutkimuksen maastotöiden kustannukset maksettiin.

Espoossa 8.10.2020

Pauli Kartano

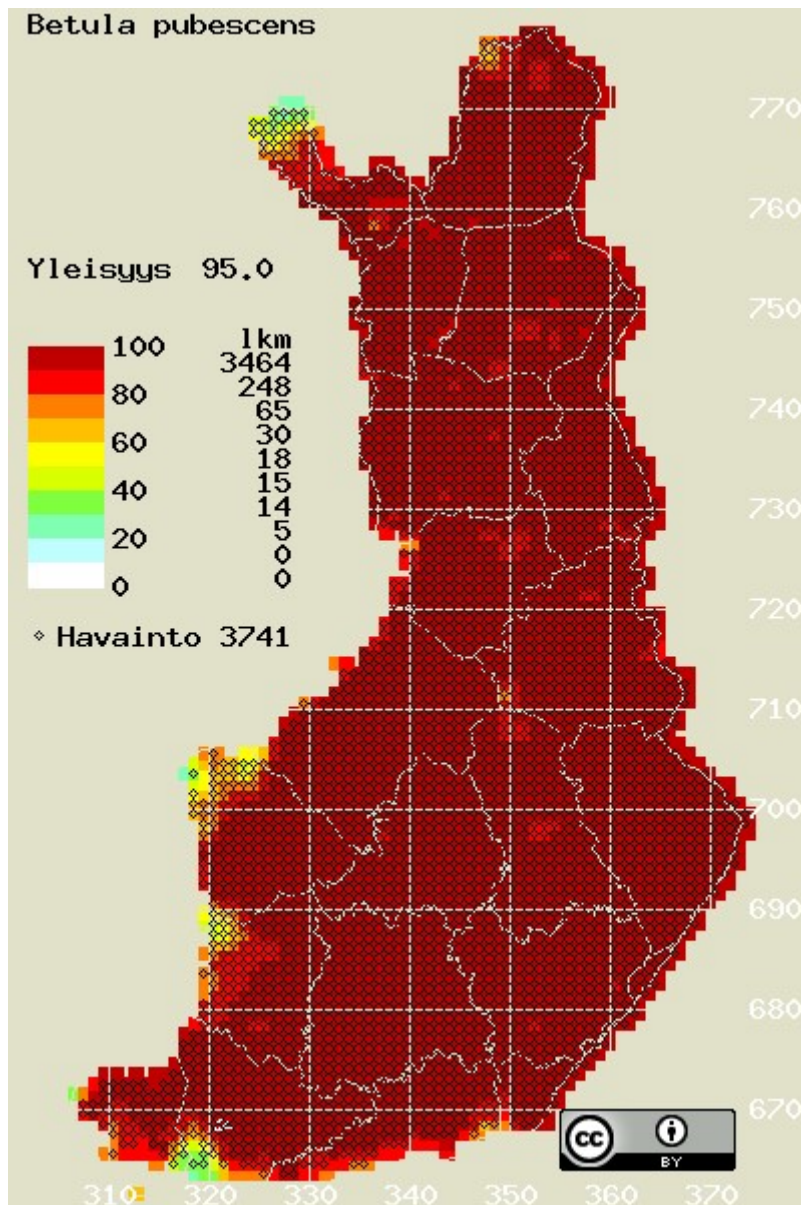
1. JOHDANTO

1.1. Hieskoivusta yleisesti

Hieskoivun nimi tulee sen kosteammista eli hikevämmissä kasvupaikoista raudukseen verrattuna (Järvinen 2012). Nimen alkuosa hies kuuluu samaan sanueeseen kuin hiki. Eri puolilla Suomea hieskoivua on sanottu hikikoivuksi, hikiäiseksi tai hikiäiskoivuksi (Heikura ja Kumpula 2016). Vaihtoehtoinen nimensyntyteoria on, että hieskoivun lehdet ”hikoilevat”, muuttuvat limaiseksi lämpimässä vedessä (Lehtonen 2016).

Hieskoivu (*Betula pubescens Ehrh.*) on Suomen kolmanneksi yleisin puulaji männyn ja kuusen jälkeen kokonaistilavuuden perusteella, mutta runkoluvulla tarkasteltuna hieskoivun on selkeästi Suomen yleisin puulaji (Korhonen ym. 2017). Se on yleensä yksirunkoinen puu, joka kukkii huhti-kesäkuussa (Väre ja Kiuru 2013). Hieskoivun alkuperä on Euroasiassa (Pinkka... 2020) ja sen levinneisyys kattaa alueen Brittein saarilta ja Etelä-Ranskasta pitkälle Siperian itäosiin. Suomessa hieskoivua kasvaa lähes koko maassa aivan pohjoisinta tunturi-Lappia lukuun ottamatta (Kuva 1). Hieskoivu on rauduskoivua (*Betula pendula Roth.*) pienempi ja lyhytikäisempi, se kasvaa noin 20-metriseksi ja 70–90-vuotiaaksi. Se on ulkomuodoltaan vaihtelevampi kuin rauduskoivu.

Hieskoivu ei ole kovinkaan vaateliias kasvupaikoiltaan, se kasvaa sekä kuivilla että märillä paikoilla metsissä, soilla, rannoilla, pientareilla ja hylätyillä pelloilla (Väre ja Kiuru 2013). Keskimäärin se kasvaa kosteammilla mailla kuin rauduskoivun ja siitä syystä se tunnetaan myös nimellä suokko eli suokoivu (Vuokko 2005). Hieskoivu sietää hyvin varjostusta alikasvoksena kosteissa ja valoisissa metsissä.



Kuva 1. Hieskoivun yleisyys (prosenttifrekvenssi välillä 0–100) yhden km²:n ruuduissa maan eri osissa (Lampinen ja Lahti 2019).

1.2. Hieskoivun osuus Suomen metsissä

Valtakunnan metsien 11. inventoinnin (VMI11) tilastojen mukaan mänty on Suomen yleisin puulaji ja sitä on 49,3 % puuston tilavuudesta metsämailla. Toiseksi yleisin puulaji on kuusi, jota on 30,6 %. Lehtipuiden osuus on yhteensä 20,1 %, josta koivua on 82,2 %. Koivua on näin ollen Suomen puuston tilavuudesta 14,4 prosenttia ja tästä hieskoivun osuus on 61,3 % eli hieskoivua on 11,9 % ja rauduskoivua 4,6 % Suomen puuston tilavuudesta (Korhonen ym. 2017).

Jos yleisyyttä tarkastellaan runkoluvun perusteella, niin hieskoivu on ylivoimaisesti Suomen yleisin puulaji, sitä on 32,6 miljardia runkoa, kun mäntyjä on 17,3 miljardia runkoa, kuusta 12,7 miljardia runkoa ja rauduskoivua 3,2 miljardia runkoa. Yleisyyttä korostaa keskimääräinen runkoluku hehtaaria kohtaan, joka on hieskoivulla 1 432 runkoa/ha, männyllä 761 runkoa/ha, kuusella 560 runkoa / ha ja rauduskoivulla 141 runkoa/ha (Korhonen ym. 2017).

Kokonaistilavuuden ja runkoluvun määristä saadaan suoraan yksittäisen rungon keskitilavuus, joka hieskoivulla on selkeästi muita yleisiä puulajeja pienempi, 8,7 litraa, kun se männyllä on 67,6 litraa, kuusella 55,5 litraa ja rauduskoivulla 33,2 litraa.

Soilla hieskoivun osuus on selkeästi suurempi kuin kankailla johtuen hieskoivun ominaisuuksista. Hieskoivun osuus kankailla on 8,9 % ja soilla 2,5 kertainen eli 22,4 % (Taulukko 1).

Taulukko 1. Hieskoivun tilavuus (1 000 m³) Suomessa ja prosenttiosuus Suomen koko puustosta eri kasvupaikoilla puutavaralajeittain (Korhonen ym. 2017).

	Hieskoivun tilavuus (1 000 m ³)			Hieskoivun %-osuus koko puuston tilavuudesta		
	kankailla	soilla	metsämailla	kankailla	soilla	metsämailla
Tukkipuu	8 909	4 675	13 584	1,6 %	4,6 %	2,0 %
Kuitupu	114 251	86 587	200 838	10,6 %	24,3 %	14,0 %
Hukkapuu	34 675	23 916	58 591	26,2 %	44,0 %	31,4 %
Kokonaistilavuus	157 835	115 178	273 013	8,9 %	22,4 %	11,9 %

Hieskoivu ei kasva kovinkaan järeäksi verrattuna muihin pääpuulajeihin. Männyn tilavuudesta tukkipuun osuus on 29,3 %, kuusen 42,1 % ja rauduskoivun 20,9 % (Korhonen ym. 2017).

Tukkipuun osuus hieskoivuista metsämailla on vain 5,0 % (kankailla 5,6 % ja soilla 4,1 %). Valtaosa hieskoivun tilavuudesta on kuitupuuta, jonka osuus on 73,6 % (kankailla 72,4 % ja soilla 75,2 %). Hukkapuun osuus on 21,5 % (kankailla 22,0 % ja soilla 20,8 %)

Taulukko 2(Taulukko 2).

Taulukko 2. Hieskoivun tilavuusjakauma eri kasvupaikoilla puutavaralajeittain (metsämaa on kankaat ja suot yhteensä) (Korhonen ym. 2017).

	%-osuus kankailla	%-osuus soilla	%-osuus metsämailla
Tukkipuu	5,6 %	4,1 %	5,0 %
Kuitupuu	72,4 %	75,2 %	73,6 %
Hukkapuu	22,0 %	20,8 %	21,5 %

Uusimman, kahdennentoista, valtakunnan metsien arvioinnin (VMI12) lukujen perusteella koivun suurin kestävä hakkuukertymäarvio vuosille 2015–2024 on runkopuun osalta 16,54 miljoonaa kuutiometriä vuosittain (Vaahtera 2020). Tämä vastaa 19,6 prosenttia koko puuston hakkuukertymästä, mutta siinä ei ole eroteltu raudus- ja hieskoivujen eri osuuksia.

1.3. Hieskoivun käytön historia

Hieskoivu ei ole ollut metsänkäyttäjien ja päättäjien suosiossa 1900-luvulla. Toisen maailmansodan jälkeen metsänhoito oli hyvin teollisuusvetoista ja tehokkuus ohjasi ajattelua hyvin voimakkaasti. 1948 kuusi johtavaa metsäntutkijaa ja opettajaa julkaisivat harsintajulkilausuman, joka tuomitsi hyvin voimakkaasti poimintahakkuut (harsinta), yläharvennuksen sekä määrämittaharsinnan (Appelroth ym. 1948). Julkilausuma ohjasi metsähoitoa vuosikymmeniä voimakkaasti tasaisempaa rakennetta suosivia menetelmiä kohti.

Samoihin aikoihin koivua pidettiin roskapuuna ja sitä kutsuttiin ”metsien valkoiseksi valheeksi”. Koivun alhaista arvostusta selitti pieniläpimittaisen ja huonolaatuisen koivun suuri määrä, jonka ainoa käyttö oli polttopuu (Kauhanen 2008).

Vuonna 1970 nimimerkki Liimatainen otti Suomen Kuvalehdessä kantaa koivun asemaan: ”Voidaan siis sanoa, että tuottoisimmassa metsäsuomessa oli 1930-luvulla, joka viides puu koivu, nyt tuskin joka kahdestoista. Samana hävityshakkuiden kautena koivusta on tullut puunjalostusteollisuudessa entistä tärkeämpi raaka-aine. Se ei enää ole roska- eikä edes polttopuu vaan sekä kysytty tukki että ainespinotavara, joten sillä on kysyntää ja kantohintaa (Liimatainen 1970).” Nimimerkki Liimataisen takana oli presidentti Urho Kekkonen.

Koivun arvonalauttaminen käynnistyi 1960-luvulla hyvälaatuisten vanerikoivikoiden loppumisen pelon myötä ja samalla koivututkimus käynnistyi laajemmin. Koivun tutkimisen uranuurtajana pidetään ”koivukeisari” Jyrki Rauloa, joka tuli tunnetuksi laajoista ja tuloksellisista tutkimuksista (Kauhanen 2008, Koski 2009).

Koivun maineenpalautus ei kuitenkaan yltänyt hieskoivuun asti, vaan panostus ja arvostus koski rauduskoivua. Vuonna 1983 Metsäntutkimuslaitoksen (nykyään Luonnonvarakeskus) professori Kullervo Kuusela lausui Ylivieskan metsänhoitoyhdistyksen kokouksessa, että ”hieskoivu on metsiemme hukkakaura”. Kommentti liittyi Energiametsätoimikunnan 1979 esitykseen, että Suomessa tulisi varata 750 000 hehtaaria hieskoivun energiahakkeen tuotantoon (Pohjonen 2016). Kommentti ei juuri hieskoivun mainetta nostanut ja osittain sen takia hieskoivun viljelyä ei ole Suomessa juuri harjoitettu.

Vuonna 2018 Suomen metsäteollisuus käytti kotimaista ja tuontiraakapuuta yhteensä 73,6 miljoonaa kuutiometriä, tukkipuuta tästä oli 27,5 miljoonaa kuutiometriä ja kuitupuuta 43,3 miljoonaa kuutiometriä (Ylitalo 2019). Lehtipuun, josta hyvin suuri osuus on koivua, osuus tukkipuusta oli 4,7 %, eli 1,3 miljoonaa kuutiometriä ja kuitupuusta 30,8 % eli 13,5 miljoonaa kuutiometriä. Lehtipuissa kuitupuun osuus on huomattavasti suurempi sekä kuutiometreinä sekä prosenttiosuutena, mikä kertoo sekä teollisuuden tarpeista, että saatavilla olevan raaka-aineen koosta.

Tilastot eivät erottele hieskoivun käyttöä rauduskoivusta, mutta hieskoivua käytetään Suomessa lähinnä energia- ja kuitupuuna, koska se on pienikasvuisempi. Tämä käy myös hyvin ilmi VMI-aineistossa, jossa hieskoivun tukkiprosentti (5,0 %) on huomattavasti pienempi kuin rauduskoivun (20,9 %), männyn (29,3 %) ja kuusen (42,1 %) (Korhonen ym. 2017).

Tulevaisuudessa hieskoivun merkitys todennäköisesti vain kasvaa, koska energiapolitiikassa tavoitteet kohti hiilineutraalisuutta tiukkenevat ja tällöin puun merkitys energianlähteenä korostuu. Lisääntyvä hiilineutraalien energianlähteiden kysyntä suosii hieskoivua, joka viihtyy suometsissä, jossa on eniten käyttämätöntä hakkuupotentiaalia Suomessa.

Niemistön Pohjanmaalla ja Länsi-Lapissa tekemien tutkimusten perusteella hieskoivikot nousevat parhaaksi vaihtoehdoksi, kun tarkastellaan puuston hyödyntämistä pelkästään energiapuuna. Turvemaan hieskoivikot ovat edullisinta kasvattaa harventamatta noin 50 vuoden kiertoajalla, sillä harventamattomuus ei vaikuta kuitupuun saantoon. Kuitupuun korjuun kannattavuus riippuu sen kustannuksista verrattuna pelkkään energiapuun korjuuseen (Niemistö 2012) verrattuna.

Suurin metsähakepotentiaalin kasvu löytyy pienpuusta, etenkin aines- ja energiapuun yhdistetyllä korjuulla. Pienpuun metsähakepotentiaali koivulla on 2,1–3,4 miljoonaa kuutiometriä riippuen hakkuutavasta (Asikainen ja Anttila 2013). Lehtipuiden osuus pienpuun potentiaalista kasvaa 46 prosentista 56 prosenttiin, kun hakataan rinnankorkeusläpimitaltaan alle 10,5 cm puut (Anttila 2018). Kolmasosa pienpuun potentiaalista sijaitsee turvemailla ja kaksi kolmannesta kivennäismailla.

1.4. Hieskoivun teollinen käyttö

Hies- ja rauduskoivua ei teollisessa käytössä erotella ja käytännössä kaikki tilastot huomioivat koivun yhtenä puulajina. Hies- ja rauduskoivun puuaines on hyvin samanlaista. Niiden puuaines on vaaleaa, syykuvio erottuu heikosti eikä sydänpuu erotu pintapuusta (Hieskoivu... 2020, Rauduskoivu... 2020). Lisäksi ne vaativat huolellisen kuivatuksen, koska ne ovat helposti lahoavia. Koivun työstöominaisuudet ovat hyvät, se on helppotyöstöinen, homogeeninen, hyvin lastuava ja kiillottuva (Koivu, Puuinfo... 2020).

Hies- ja rauduskoivun puuaineksella on kuitenkin joitain eroja. Hieskoivu on pehmeämpää, vähemmän sitkeää ja teknisiltä ominaisuuksiltaan hieman heikompaa kuin rauduskoivu (Rauduskoivu... 2020). Hieskoivu on myös rauduskoivua suorasyisempi ja niin ollen se on helpompi halkaista (Hieskoivu... 2020).

Metsäteollisuuden kotimaisen raakapuun käyttöä Suomessa vuonna 2018 on esitetty taulukossa 3. Suurin osa (89,7 %) Suomessa käytettävästä kotimaisesta lehtiraakapuusta, ja sitä kautta myös hieskoivusta, on kuitupuuta ja siitä käytännössä kaikki eli 8,98 miljoonaa kuutiometriä käytetään massateollisuudessa. Lehtipuun toiseksi suurin käyttäjä on vaneriteollisuus, joka käyttää 945 000 kuutiometriä lehtipuutukkeja. Loput raakalehtipuusta

käytetään sahoilla. Metsäteollisuus suosii rauduskoivua sen tasaisemman laadun, suuremman rungon ja suuremman järeyden takia.

Taulukko 3. Metsäteollisuuden kotimaisen raakapuun käyttö Suomessa vuonna 2018, tuhatta kuutiometriä (Ylitalo 2019).

	Kaikki toimialat yhteensä	Suuret ja keskisuuret sahat	Pien- sahat	Vaneri- teolli- suus	Muu	Mekaaninen massa- teollisuus	Puolikemial- linen massa- teollisuus	Selluteol- lisuus
Lehtikuitupuu	8 984	1				530	1 174	7 278
Kuitupuu yhteensä	37 513	3 199	97		6	5 716	1 174	27 320
Lehtitukki	1 033	42	43	945				4
Tukkipuu yhteensä	26 958	23 132	511	2 766	287	120		143
Raakapuu yhteensä	64 471	26 330	608	2 766	293	5 837	1 174	27 463

Rauduskoivua hento-oksaisemmasta hieskoivusta voidaan kuitenkin saada sahatavaraa sekametsissä päätehakkuuseen asti, kivennäismailla hieskoivu karsii itse itseään ja lahovioissa ei ole eroa rauduskoivuun nähden (Heräjärvi 2001). Jos hyväksytään vaneripuukokoa pienemmät tukit sahaukseen tai vaneripuuksi, niin lähinnä ruohoisilta turvemailta voidaan saada jalostuskelpoisia hieskoivutukkeja, mutta keskiviljavilta ja viljavilta ojiteuilta kivennäismailla niiden saatavuus on vähäinen (Verkasalo 1997).

Sahatavaraa jalostetaan edelleen huonekaluteollisuudessa, puusepänverstaissa ja sorvaamoissa, joissa kestäväää ja taipuisaa hieskoivua arvostetaan (Koivu, yleisin lehtipuulajimme, on taipuisa terveyspommi. 2019). Näissä volyymit ovat puulevyteollisuuteen verrattuna huomattavasti pienempiä.

Kiinteitä puupolttoaineita eli metsäteollisuuden sivutuotepuuta, metsähaketta, kierrätyspuuta sekä puupellettejä ja -brikettejä käytettiin Suomessa vuonna 2019 yhteensä 20,5 miljoonaa kiintokuutiometriä. Metsähakkeen osuus oli 7,6 miljoonaa kuutiometriä, josta pienpuuta oli 3,9 miljoonaa kuutiometriä eli 51 % metsähakkeesta (Ylitalo 2019). Loput koostuivat latvusmassasta, kannoista ja järeästä runkopuusta, jossa koivun ja varsinkin hieskoivun osuus on pieni. Jos oletetaan koivun osuus pienpuusta samaksi kuin metsä-

hakepotentiaalissa (vaihteluväli 30,1 %–37,3 %) (Asikainen ja Anttila 2013), niin pienpuuna koivua käytettiin metsähakkeeksi noin 1,2–1,5 miljoonaa kuutiometriä ja käyttämättömä potentiaalia olisi 0,6–2,2 miljoonaa kuutiometriä.

Teollisuudessa suurin osa (8,9 miljoonaa kuutiometriä) koivusta menee massateollisuuteen, toiseksi suurin osuus (noin 1,3 miljoonaa kuutiometriä) menee metsähakkeeksi, kolmanneksi suurin osuus (0,9 miljoonaa kuutiometriä) vaneriteollisuuteen. Näiden lisäksi metsähaketta poltettiin pientaloissa 0,6 miljoonaa kuutiometriä (Ylitalo 2019), josta koivun osuus tästä tuntematon. Tilastoissa ei juurikaan erotella raudus- ja hieskoivua, mutta esimerkiksi VMI11:n perusteella (Korhonen ym. 2017) voidaan olettaa, että suurin osa vaneriteollisuuden käyttämästä koivusta on rauduskoivua ja hieskoivun osuus kasvaa puuden koon pienentyessä.

Hieskoivu on rauduskoivua heikompi vaneripuu keskiviljavilla kivennäismailla pienemmän kokonsa ja huonomman tyvitukkiosan runkomuodon (lenkous, kapeneminen ja epäpyöreys) takia, mutta jotkut sen ominaisuudet ovat rauduskoivua parempia: matalampi terveoksa- ja latvusraja, vähäisempi tukkipuiden tyveäminen ja latvavähennysten tarve sekä lahovikojen harvempi esiintyminen (Verkasalo 1997).

1.5. Hieskoivun energiapuukäyttö

Suurin potentiaali hieskoivulla on energiapuuna (Verkasalo 1997), koska hieskoivu harvemmin kasvaa tukkipuun mittoihin ja suuri osa hieskoivusta on pieniläpimittaista, mitä ei voi teollisesti hyödyntää kuin energiana. Hieskoivu pioneeripuulajina muodostaa helposti tiheiköitä varsinkin kosteille kasvupaikoille. Hieskoivuvaltaisten metsien pinta-alan ei odoteta pienenevän, koska uudistamisen ja taimikonhoidon laiminlyönnit sekä havupuulle uudistamisen epäonnistuminen puutteellisen taimikonhoidon tai hallatuhojen vuoksi jatkuvat (Niemi ym. 2017).

Puun kuoren lämpöarvot ovat korkeampia kuin puuaineksen ja se korostaa latvuksen arvoa energiantuotannossa, koska lehdettömän latvuksen massasta noin kolmasosa on kuorta (Nurmi 1997). Kuoren korkeampi lämpöarvo nostaa pieniläpimittaisen hieskoivun kokonaislämpöarvoa, koska pienillä puilla kuoren suhteellinen osuus on suuria puita korkeampi.

Hieskoivun kuoren lämpöarvo on selkeästi männyn ja kuusen vastaavia korkeampi, männyn kuoren lämpöarvo on 20,3 MJ/kg, kuusen 19,60 MJ/kg ja hieskoivun 21,03 MJ/kg (Nurmi 1997). Hieskoivikoiden runsaus, niiden pieniläpimittaisuus ja kuoren korkea lämpöarvo kaikki osaltaan tekevät niistä mielenkiintoisen energiapuukohteen. Niemistön ym. (2017) tutkimuksessa 2–3 metrin valtapituiset hieskoivikot kannattaa kasvattaa koivikona harventamatta, eikä uudistaa kuuselle. Tällöin parhaan taloudellisen tuloksen antaa energiapuun kokopuukorjuu siihen soveltuvalta kalustolta.

Hakkuun ja energiapuun polton välinen aika voi olla jopa kaksi vuotta, mistä aiheutuu pääomakustannuksia, koska rankapuulle on tienvarsivarastossa sitoutunut pääomaa yhteensä noin 30 €/kuutiometri (Lahti ym. 2018). Korkokustannusten lisäksi tappiota aiheutuu lämpöarvon menetyksestä, joka on tilavuutta kohden 3,6–9,6 % kasvukauden aikana (Nurmi 2014).

Lahden ym. (2018) tutkimuksessa Kauhavan Kaukolämpö Oy kokeili tuoreen metsähakkeen polttoa 10 MW:n kattilatehon lämpölaitoksella, jossa on kondensoiva savukaasujen pesu- ja lämmöntalteenottojärjestelmä. Kokeissa havaittiin laitoksen lämpötehon nousseen ja hakkeen kulutuksen vähentyneen, ja lisäteho on ollut jopa yli 30 % kattilatehoon verrattuna. Samanaikaisesti palamislämpötilat ovat korkeat ja savukaasujen häikäpitoisuus pieni. Lahti ym. (2018) löysi tähän kaksi syytä: 1) uuteaineita ei ollut ehtinyt haihtua, eikä kuiva-ainetta menetetty lahoamisen takia ja 2) savukaasuihin siirtynyt kosteus toimi tehokkaana lämmönsiirtäjänä, mikä hyödynnettiin savukaasujen lämmöntalteenottojärjestelmällä.

Edellisten syiden perusteella voidaan päätellä, että hieskoivun ja erityisesti tiheiden hieskoivikoiden hyödyntäminen energiapuukäytössä olisi kannattavaa, varsinkin kun hyödynnettäisiin kokopuunkorjuuseen soveltuvaa kalustoa ja huolehdittaisiin logistiikkaketjun tehokkuudesta, joka mahdollistaisi varastoinnin minimoinnin ja tuorepolton.

1.6. Hakkuukoneen keräämät tiedot

Ylivoimaisesti käytetyin työ-, urakointi- ja luovutusmittausmenetelmä Suomessa on hakkuukonemittaus, jonka osuus mitatusta puumäärästä pystykaupoissa on yli 83 % ja hankintakaupoissa yli 30 % (Melkas 2018). Käytännön toimintaa ohjaa laki puutavaran mittauksesta (414/2013) (Laki puutavaran mittauksesta (14.6.2013/414). 2013) ja siihen liittyvä maa- ja metsätalousministeriön asetus puutavaran mittauksen mittausmenetelmäryhmien tarkemmasta sisällöstä sekä mittauslaitteiden käytöstä (Nro 12/13) (Maa- ja metsätalousministeriö 2013) sekä Luonnonvarakeskuksen määräys puutavaran mittaukseen liittyvistä yleisistä muuntoluvuista (Luonnonvarakeskus 2017).

Metsätehon Mittaus ja laatu -oppaan (Melkas 2018) mukaan hakkuukoneen mittalaitteella tulee olla seuraavat ominaisuudet:

- valmistetun puutavaran tai rungon osan pituuden ja läpimitan mittaus
- tilavuuden laskenta pätkittäin ja tulosten rekisteröinti 0,001 m³:n tarkkuudella
- tyvipölkyn tyviosan tilavuuden laskenta
- pituuden ja läpimitan näyttö
- tulostus myös paperille
- säätöarvojen rekisteröinti ja tulostus
- yksittäisten mittausarvojen tarkastusmahdollisuus
- mittalaitteen toimivuuden seurannassa tarvittavien näyterunkojen valinta satunnaisesti ja omavalintaisesti sekä näiden runkojen mittaustietojen ja tulosten rekisteröinti.

Kun mittauserän tilavuus on vähintään 10 kuutiometriä, on suurin sallittu poikkeama hakkuukonemittauksessa 4 %. Läpimitan mittaus tehdään vähintään 0,5 metrin välein, paitsi tyvipölkyn osalta, jossa ensimmäinen mittaus tehdään 1,3 metrin etäisyydeltä kaatosahauksesta. Pölkyn pituus mitataan vähintään senttimetrin tarkkuudella katkaisupintojen keskimääräisenä etäisyytenä. Tilavuus lasketaan läpimitan ja pituuden mittaustietojen pohjalta ympyrälieriön tai katkaistun ympyräkartion tilavuutena pätkittäin tai pölkyn kolmiulotteisen mallin tilavuutena (Maa- ja metsätalousministeriö 2013).

Hakkuukoneen mittalaite mittaa rungon läpimitan kolmiomittauksena yhden millimetrin tarkkuudella 1 senttimetrin välein tai tiheämmin ja tilavuus lasketaan ensimmäisen 1,3 metrin osalta tyviprofiilifunktiota käyttäen ja muuten lieriön tai katkaistun kartion kaavoilla (Melkas 2018). Hakkuukone ei mittaa koko puun pituutta, vain valmistettujen pätkien pituudet, eikä myöskään oksien tai latvuksen tunnuksia. Latvan pituus, kannonkorkeus ja rinnankorkeusläpimitta voidaan tarvittaessa laskea niitä arvioivilla malleilla tai runkokäyrillä.

Mittaustiedot tallennetaan metsäkoneiden tiedonsiirtostandardin (StanForD 2015) mukaisesti ja niitä käytetään muun muassa kauppahinnan ja urakointimaksujen määrittämiseen, runkomuodon ennustamiseen, katkonnin ja lähikuljetusten suunnitteluun (Melkas ja Härmäläinen 2015). Toimivan biomassamallin avulla mittaustietojen pohjalta voitaisiin laskea paljon muitakin ominaisuuksia ja niitä voitaisiin hyödyntää eri tasoilla, esimerkiksi energiapuun osalta.

1.7. Puun mallinnus

Rungon tilavuuden laskenta, johon hyvin monet tiedot metsästä perustuvat, on metsien laskennan perustavanlaatuisen ongelma. Nyssösen (1959) historiallisen katsauksen mukaan tutkimus Suomessa on painottunut puiden tilavuuden määrittämiseen. 1900-luvun alkupuolella hyödynnettiin Keski-Euroopassa tehtyjä kuutioimiskaavoja, joita täydennettiin (Nyssönen 1959). Suomessa puun rungon muotoa tutki ensimmäisenä Cajanus 1910-luvulla ja Lakari täydensi asiaa 1920-luvulla (Nyssönen 1959). Lönnroth julkaisi ensimmäiset laskentamallit rungon tilavuuden laskentaan 1927 (Lönnroth 1927) ja sen jälkeen suomalaiset ovat tutkineet pääasiassa männyn ja koivun rungon muotoja ja runkokäyriä.

Ilvessalo (1947) julkaisi noin 12 000 koepuun aineistoon perustuvat pystypuiden graafisin tasoituksin valmistetut kuutioimistaulukot, jotka kertoivat puulajeittain puun kuorellisen tilavuuden, kun rinnankorkeusläpimitta, pituus ja kapeneminen tunnetaan. Kapenemisella tarkoitetaan yli 8 metriä pitkällä puulla rinnankorkeusläpimitan ja 6 metrin korkeudella olevan läpimitan erotusta. Ensimmäiset tietokonetta ja lineaarista regressiota hyödyntäneet tilavuusyhtälöt tehtiin lehtikuuselle (Vuokila 1960).

Nykyään Suomessa laajasti käytössä olevat runkokäyrät männylle, kuusella ja koivulle on kehittänyt Laasasenaho (1982). Hies- ja rauduskoivulle erillisiä malleja ei kehitetty, vaan käytetty aineisto sisälsi sekä hies- että rauduskoivuja kuitenkin niin, että isoimmat puut otoksessa olivat rauduskoivuja ja keskikokoiset lähinnä hieskoivuja. Niiden avulla voidaan laskea läpimittoja rungon eri korkeuksille ja ennustaa puun rungon muotoa.

Laasasenaho (1982) kehitti kaksi erilaista runkokäyrän laskentamallia: polynomimallin ja yhtälöryhmämallin. Polynomimallin polynomien potenssit perustuvat Fibonaccin lukusarjaan ja polynomien kertoimet lasketaan regressioanalyysin avulla. Yhtälö (Yhtälö 1) rakennettiin puun suhteellista pituutta käyttäen siten, että yhtälön vasen puoli, eli estimoitava muuttuja, on rungon läpimitan korkeudella l suhde rungon läpimittaan 20 % korkeudella ja oikea, eli selittävä puoli, on polynomi.

$$\frac{d_l}{d_{.2h}} = b_1 1x + b_2 x^2 + b_3 x^3 + b_4 x^5 + b_5 x^8 + b_6 x^{13} + b_7 x^{21} + b_8 x^{34}, \quad (1)$$

jossa

d_l = läpimitta korkeudella l maasta

$d_{.2h}$ = läpimitta 20 %:n korkeudella

$b_1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ = vakiokertoimet

$x = 1 - l/h$ eli suhteellinen etäisyys latvasta

Yhtälöryhmämallissa on nimensä mukaisesti useita yhtälöitä eli toisin sanoen puun runko on mitattu pätkittäin suhteellisilta korkeuksilta ja jokaiselle suhteellisen korkeuden läpimitalle on laadittu oma yhtälönsä. Yhtälöryhmämalli vaatii useampia mittauksia rungon eri suhteellisilla korkeuksilla.

Spline-funktiolla lasketaan suhteellisille korkeuksille laskettujen läpimittojen kautta kulkeva runkokäyrän siten, että käyrä on tasainen ja mahdollisimman sileä. Spline toimii hyvin, kun käytetään pieniasteisia polynomeja. Runkokäyrä voidaan luoda myös käyttämällä spline-funktiota edellyttäen, että rungosta on mitattu riittävästi läpimittoja (Lahtinen ja Laasasenaho 1980).

Niin Laasasenahon (1982) mallit kuin aiemmatkin keskittyivät vain puun rungon kuvaamiseen ja muu puun biomassaa, juuret, oksat ja lehdet, jätettiin huomioimatta. Runkokäyrämalleja täydentämään ja laajentamaan on kehitetty useita puiden biomassamalleja. Niissä käytetään selittävinä tekijöinä osittain samoja muuttujia kuin runkokäyrämalleissa, eli puun pituutta ja rinnankorkeusläpimittaa sekä elävän latvuksen rajaa, latvuksen pituutta ja puun ikää. Mallit määrittävät biomassan eri tavoin, jotkut ottavat mukaan osan juurista, osa kaikki juuret, osa maanpäällisen biomassan.

Hakkila selvitti puiden biomassaa tutkimalla puiden tiheyksiä (Hakkila 1979) ja latvuksen biomassaa (Hakkila 1991). Tiheystutkimuksessa otos oli 310 koivua, josta mitattiin tiheyksiä eri osissa (Hakkila 1979) ja tuloksena saatiin kuiva-tuoretiheyksiä maan eri osissa erilaisista koivuista sekä runkojen kuivapainotaulukot, jossa hyödynnettiin Laasasenahon (1982) kuutioimisytälöitä. Hakkuupoistuman latvusmassaa tutkittiin 1 486 koivun otoksella, joista laskettiin latvusmassa 2 metrin runkopätkiä kohti ja tuloksena oli taulukot latvuksen kuivamassan suhteellisesta jakautumisesta puun pystysuunnassa (Hakkila 1991).

Tahvanainen (2008) käytti Hakkilan aineistoa tutkimuksessaan, jossa luotiin mallit elävän latvuksen, lehtien ja kuolleiden oksien biomassasta männylle, kuuselle ja koivulle. Tahvanaisen mallit soveltuvat hakkuumäärän ja saatavan energian määrän arvioimiseen eri hakkuutavoilla ja apteerauksilla. Malleja voi myös käyttää hakkuiden suunnitteluun, sopivan hakkuutavan valintaan ja poistuvan ravinteiden määrän arviointiin eri hakkuutavoilla (Tahvanainen 2008).

Luonnonvarakeskuksen MELA-ohjelmistoon on liitetty Marklundin puutason biomassamallit (Marklund 1988) Kärkkäisen tekemän vertailun perusteella (Kärkkäinen 2005). Ohjelmistossa olevien mallien muuttujina ovat rinnankorkeusläpimitta ja pituus, paitsi koivun eläville oksille laaditussa mallissa ainoastaan rinnankorkeusläpimitta (Kärkkäinen ja Härkönen 2005).

Kärkkäinen (2005) arvioi erilaisia puukohtaisia biomassamalleja metsien mallintamiseen ja analysointiin. Tutkimus kävi läpi useita eri biomassamalleja ja päätyi tarkastelemaan tarkemmin Marklundin ja Hakkilan malleja (Marklund 1988, Hakkila 1991). Empiirisen datan puuttuessa analyysi tehtiin vertailemalla malleja toisiinsa sekä muihin malleihin.

Marklundin (1988) mallit osoittautuivat soveliaammiksi puiden eri komponenttien biomassan arviointiin. Marklundin aineisto oli kaikista edustavin puukohtaisiin biomassamalleihin ja vaikka aineisto oli kerätty Ruotsista se kattaa hyvin Suomen olosuhteetkin (Kärkkäinen 2005). Kärkkäisen mukaan Marklundin mallit toimivat hyvin runkopuun mallintamisessa, mutta epävarmuus lisääntyy, kun puun muita osia otetaan huomioon. Näin ollen Marklundin mallit soveltuvat paremmin maan yläpuolisen hiilen sitoutumiseen kuin energiapuiden biomassan arvioimiseen.

Repola (2008) loi biomassamallit koivulle käyttäen 127 puun aineistoa. Biomassamallissa arvioitiin runkopuu, rungon kuori, elävät ja kuolleet oksat, lehdet, kanto ja juuret. Repolan aineistossa suurin osa (66 %) oli rauduskoivuja ja loppu hieskoivuja. Mallit eivät erottele lajeja toisistaan, vaan mallit ovat koivun malleja. Lopputuloksena Repolalla oli kolme mallia maan yläpuoliselle biomassalle ja yksinkertaisimmassa mallissa selittävinä tekijöinä oli puun pituus ja läpimitta ja muissa malleissa muuttujina olivat lisäksi muun muassa latvusraja ja rinnankorkeusikä.

Eri malleja voidaan hyödyntää myös yhdessä hakkuukoneen tekemien mittausten kanssa (Repola ym. 2011). Repolan ym. tutkimuksessa koottiin ja osin kehitettiin latvusmassan ja kantopuun biomassamallit ja arviointiin hakkuukonemittauksen soveltuvuutta niiden käyttöön. Hakkuukone mittasi läpimitat luotettavasti, mutta pituuden mittauksessa hakkuukone antoi pienempiä tuloksia. Läpimitat hakkuukone mittaa antureilla, mutta pituus arvioidaan laskennallisesti, koska latvaosa ei mene hakkuulaitteen läpi. Tutkimuksessa käytettiin Repolan (Repola 2009) biomassamalleja ja hakkuukonemittaus tuotti noin 5 % pienemmän runkobiomassan ja noin 4 % suuremman latvusbiomassan pystymittaukseen verrattuna (Repola ym. 2011).

Useat edellä mainitut mallit pohjaavat suureen määrään koepuita ja niiden tekeminen on hyvin suuritöinen urakka. Kuitenkin jo hyvinkin pienellä koepuumäärällä voidaan tehdä melko luotettavia suhteelliseen pituuteen pohjautuvia malleja johtuen pääasiassa puulajin samanlaisesta suhteellisesta runkomallista (Laasasenaho ym. 2002).

Biomassamalleja ei, kuten muitakaan malleja, tehdä yleensä erikseen hies- ja rauduskoivuille, vaan mallit ovat niille yhteisiä. Hoppi loi pro gradu työssään mallin hieskoivun

maan yläpuoliselle biomassalle (Hoppi 2018), jossa selittävinä tekijöinä käytetään rinnankorkeusläpimittaa ja pituutta. Hopin mallit tuottavat hieskoivun rungon tilavuuden sekä maanpäällisen tilavuuden eri kokoisille hieskoivuille, mutta biomassan jakaantumista puun pituuden suhteen ne eivät ota huomioon.

1.8. Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimusongelma

Tutkimuksen tavoitteena on laatia pienellä koepuumäärällä hieskoivun maanpäälliselle tilavuudelle ja biomassalle kumulatiivinen malli, jolla voidaan arvioida tilavuuden ja biomassan jakautumista puun pituuden suhteen. Maanpäälliseen tilavuuteen ja biomassaan luetaan tässä tutkimuksessa kannon yläpuolinen runko kuorineen sekä elävät oksat. Kuolneiden oksien määrä on hieskoivulla pieni, joten niitä ei oteta huomioon (Repola 2008). Lehtiä ei myöskään oteta huomioon, koska suurin osa puunkorjuusta tapahtuu lehdettömään aikaan. Myöskään kantoa ei mallinneta.

Työssä laaditaan puukohtaiset mallit maanpäälliselle tilavuudelle, jotka koostuvat rungon ja oksien mallien yhdistelmästä, sekä vastaavat yleiset mallit hieskoivulle. Näistä voidaan tiheyden avulla johtaa biomassamallit. Tutkimuksen aineisto on kerätty hyvin suppealta alueelta, eikä tutkimuksessa oteta huomioon maantieteellistä sijaintia, eikä metsikön ominaisuuksia. Työssä hyödynnetään Hoppin (Hoppi 2018) keräämää aineistoa oman aineiston lisäksi.

Hieskoivun kumulatiivisten tilavuus- ja biomassamallien lisäksi pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Kuinka tarkka malli saadaan hyvin pienellä koepuumäärällä?
- Kuinka malli toimii eri kokoisilla hieskoivuilla?
- Mitä heikkouksia pienestä koepuumäärästä on?
- Mitä käytännön käyttökohteita mallilla voisi olla?
- Kuinka tehty malli käyttäytyy muihin vastaaviin malleihin verrattuna?

2. AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1. Koepuuaineistot

Koepuuaineisto koostuu kahdesta eri aineistosta. Ensimmäinen aineisto (11 puuta) kerättiin Helsingin yliopiston Hyytiälän metsäaseman läheisyydestä huhti-toukokuussa 2017. Aineisto koostui pääasiassa pienistä ja keskikokoisista puista. Toinen aineisto haettiin samalta alueelta Hyytiälässä maaliskuussa 2020 ja se koostui neljästä kookkaammasta puusta. Toinen koepuuaineisto pyrittiin muodostamaan mahdollisimman samalla tavalla kuin ensimmäinen aineisto. Ensimmäisen aineiston hankki Hoppi (2018) toimesta. Koepuiden pituudet vaihtelivat reilusta kolmesta metrillä miltei 20 metriin ja rinnankorkeusläpimitat alle kahdesta senttimetrillä yli 19 senttimetriin (Taulukko 4).

Taulukko 4. Koepuiden mittauksia, kasvupaikan maalaji ja kaatopäivä.

Koe- puu	Pituus (m)	Elävän lat- vuksen raja (m)	Rinnan- korkeus- läpimitta (cm)	Kasvupaikan maalaji	Kaatopäivä
1	10,27	2,76	9,4	Turvemaa	11.4.2017
2	14,34	4,07	12,7	Turvemaa	11.4.2017
3	14,38	4,24	14,0	Turvemaa	11.4.2017
4	5,98	2,56	3,2	Kivennäismaa	19.4.2017
5	7,42	2,65	4,0	Kivennäismaa	19.4.2017
6	7,76	3,02	5,0	Kivennäismaa	19.4.2017
7	3,21	1,60	1,9	Kivennäismaa	19.4.2017
8	12,45	7,73	8,4	Kivennäismaa	19.4.2017
9	12,93	5,64	10,1	Kivennäismaa	26.4.2017
10	13,02	6,27	7,9	Kivennäismaa	26.4.2017
11	19,69	9,98	19,1	Kivennäismaa	3.5.2017
12	18,80	5,30	16,2	Kivennäismaa	20.3.2020
13	19,50	9,32	16,9	Kivennäismaa	21.3.2020
14	17,40	6,65	14,2	Kivennäismaa	22.3.2020
15	17,25	6,20	16,8	Kivennäismaa	22.3.2020

Ensimmäinen aineisto kerättiin kolmelta eri alueelta. Ensimmäinen alue oli vähäravintoinen kivennäismaa, entinen pelto, joka sijaitsi viljelykäytössä olevan pellon vieressä ja jossa puut kasvoivat tiheässä. Alueen pääpuulaji oli koivu ja siellä kasvoi myös hieman muita lehtipuita. Toinen koepuualue oli turvemaata metsäautotien ja rämeen välissä. Alueella kasvoi mäntyjä, kuusia ja hieskoivuja ja se oli suon vaihtumisvyöhykkeellä. Kolmas alue sijaitsi kivennäismaalla, tuoreella kankaalla ja alueen pääpuulaji oli kuusi.

Ensimmäisen aineiston puiden rinnankorkeusläpimitta vaihteli 2–20 senttimetrin välillä ja pituus 3–20 metrin välillä. Rinnankorkeusläpimitta mitattiin 1,3 metrin päästä ylimmän kaatoa haittaavan juurenniskan päältä tai niin läheltä maanpintaa kuin moottorisahalla päästiin. Otannassa painotettiin pienempiä läpimittaisia puita. Ensimmäisestä aineistosta puuttuivat kahden suurimman puun, koepuiden 3 ja 11, tyvipään painon ja tilavuuden mittaustiedot.

Toinen aineisto, neljä suurempaa puuta, kerättiin yhdeltä alueelta (Kuva 2). Aiempaa 11 koepuun aineistoa haluttiin täydentää suuremmilla puilla, koska aiempi aineisto painottui pienempiin puihin ja kahden suurimman puun mittaustiedot olivat vajavainen. Alue sijaitsi lähellä maantietä ja se on entinen maantien rakentajien läjitysalue. Läjitysalue vastaa kasvupaikaltaan yleensä tuoretta kangasta tai lehtomaista kangasta (Uotila 2020). Alueelta löytyikin muun muassa metsäkurjenpolvi (*Geranium sylvaticum*), joka kasvaa lehdoissa, lehtomaisissa kangasmetsissä, rantapensaikoissa, tuoreilla niityillä, pientareilla (Pinkka... 2020) ja jonka mukaan on osittain nimetty Kainuu-Pohjanmaan lehtomainen kangas-tyyppi, GOMT, kurjenpolvi-käenkaali-mustikkatyyppi (Vuokko 2005). Alueella kasvoi koivikko, joka sisälsi sekä hies- että rauduskoivua ja hieman kuusen alikasvustoa.



Kuva 2. Koepuiden 12–15 kasvupaikka entisellä läjitysalueella.

Hieskoivujen tunnistamisessa käytettiin kuoren sileyttä tyvessä, puun kasvutapaa sekä puun juurille pudonneita lehtiä. Rauduskoivun tyven kaarna on tummempaa ja halkeilevaa ja se on yleensä myös runkomuodoltaan suurempi.

Toisen aineiston koepuut kaadettiin perättäisinä päivinä 20.3–22.3.2020 ja ne mitattiin osittain metsässä heti kaadon jälkeen tai samana päivänä sisätiloissa lukuun ottamatta koepuuta 15, joka kaadettiin 22.3. ja mitattiin sisätiloissa 23.3. Puut olivat kaatotuoreita mittauksia tehtäessä. Puut kaadettiin yksi kerrallaan (pois lukien puut 14 ja 15), mitattiin metsässä heti kaadon jälkeen ja kuljetettiin konehalliin, jossa loput mittaukset tehtiin kaatopäivänä.

Koepuut 14 ja 15 kaadettiin samana päivänä siten, että ensin koepuu 14 kaadettiin, mitattiin ja kuormattiin, jonka jälkeen koepuu 15 kaadettiin ja mitattiin. Sen jälkeen koepuu 14 vietiin konehallille ja haettiin erikseen koepuu 15. Koepuu 14 mitattiin konehallilla samana päivänä ja koepuu 15 varastoitiin yöksi ulos ja se mitattiin konehallilla seuraavana päivänä.

Sää kaatopäivinä oli pääosin selkeä ja öisin oli pakkasta, mutta auringon noustessa lämpötila nousi selkeästi yli nollan. Maastossa lunta oli vain varjoisissa paikoissa. Yhtenä

yönä tuli muutama sentti lunta, mutta se hävisi nopeasti päivällä. Lumi ei haitannut kaa-toja tai mittauksia.

2.2. Manuaaliset mittaukset

Toisen aineiston mittaukset pyrittiin toimimaan mahdollisimman samalla tavalla kuin ensimmäisessä aineistossa. Ensimmäisen aineiston manuaalisista mittauksista kerrotaan tarkemmin Hoppin opinnäytetyössä (Hoppi 2018).

Puun valinnan jälkeen se valokuvattiin pohjoisesta ja tyviosuus valokuvattiin erikseen (Kuva 3). Tämän jälkeen runkoon merkattiin pohjoinen ja siitä mitattiin rinnankorkeusläpimitta. Rinnankorkeusläpimitta otettiin ristimitalla eli se mitattiin elektronisilla mittasaksilla sekä pohjois-etelä- että itä-länsi-suunnassa. Rinnankorkeusläpimitta mitattiin 130 senttimetrin korkeudelta maanpinnan tasosta laskettuna.



Kuva 3. Vasemmalla koepuu 12 kuvattuna pohjoisen suunnasta ja oikealla koepuun 15 tyvi.

Seuraavaksi puu kaadettiin moottorisahalla siten, että kanto jäi mahdollisimman matalaksi (Kuva 4). Puiden koon takia niitä ei voitu kaataa aivan maanpinnan tasosta, vaan piti huomioida juurenniskat sekä tehdä kaatolovi, jotta puu saatiin kaadettua turvallisesti ja haluttuun suuntaan. Puu kaadettiin metsässä aukkokohtaan, jotta oksisto säilyisi mahdollisimman ehjänä (Kuva 4).



Kuva 4. Vasemmalla koepuun 13 kanto ja oikealla koepuu 12 kaadettuna.

Kaadon jälkeen kannonkorkeus mitattiin ja kanto valokuvattiin. Sitten mitattiin puun pituus, alimman kuolleen oksan sekä elävän latvuksen etäisyys kaatoleikkauksesta. Seuraavaksi runko katkaistiin pokasahalla 2–3 metrin pätkiksi kuljetusta varten. Näin toimittiin aina elävän latvuksen rajalle asti. Katkotut pölkyt merkattiin tarkasti ennen kuljetusta. Oksien alkaessa runko katkottiin pokasahalla lyhyemmiksi pölkyiksi (noin 40–80 senttimetriä) ja jokaisen pätkän oksat mitattiin. Oksista mitattiin oksien etäisyys tyvestä, oksien pituus sekä oksien läpimitta. Läpimitta mitattiin oksien katkaisun jälkeen ristiläpimittana,

runkoon nähden vaakatasossa sekä pystytasossa. Oksat katkaistiin joko pokasahalla, oksasahalla tai oksaleikkureilla riippuen oksan koosta ja sijainnista. Oksat katkaistiin mahdollisimman läheltä rungon pintaa.

Kunkin pätjän oksat pussitettiin jätessäkkeihin ja merkattiin vastaavan pölkyn kanssa samalla tavalla sekaannusten välttämiseksi. Oksat pätettiin oksasaksilla ja käsin pienemmiksi palasiksi, jotta ne saatiin pussitettua ja jotta kuljetuksen aikana materiaalia ei häviäisi. Pussituksen jälkeen puun osat kuljetettiin peräkärryllä konehallille (Kuva 5).



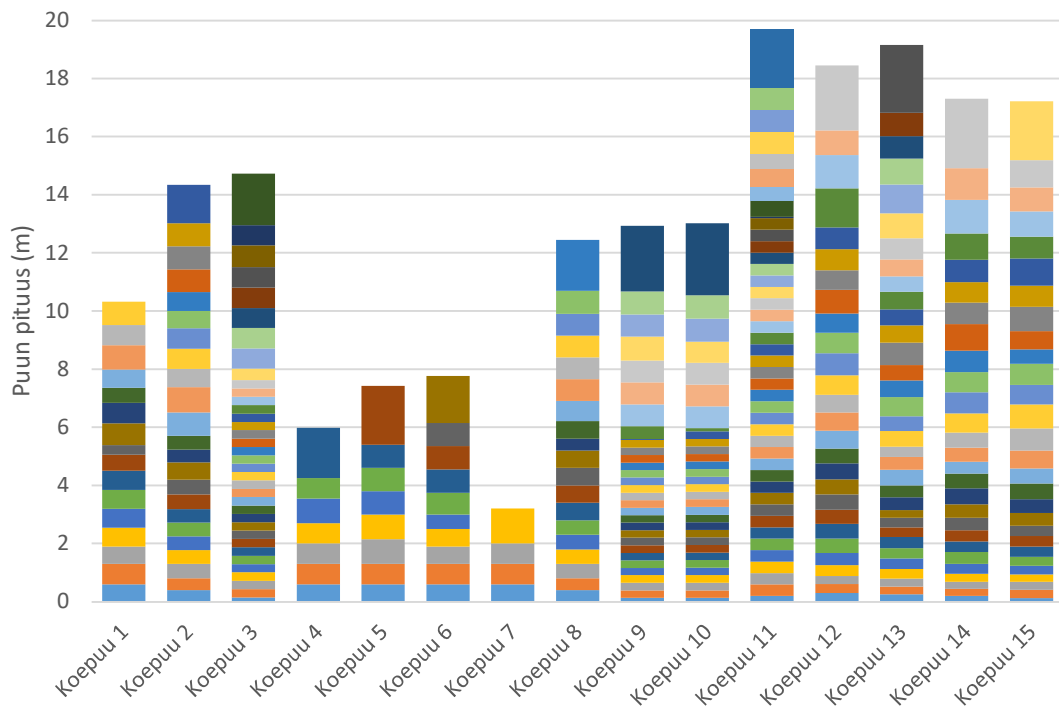
Kuva 5. Koepuu 14 pussitettuna peräkärryssä. Etualalla koepuu 15 odottaa kuljetusta.

Konehallilla rungon pidemmät, 2–3 metriset pätvät katkottiin pokasahalla lyhyemmiksi pölkkyiksi mittauksia varten. Jokaiseen pölkkyyn merkattiin tarkasti pohjoisen suunta lämpimän ristimittausta varten. Pölkkyjen pituuden vaihtelivat noin 25–60 senttimetrin välillä siten, että tyvipään pölkkyt olivat lyhyimpiä (Kuva 6).



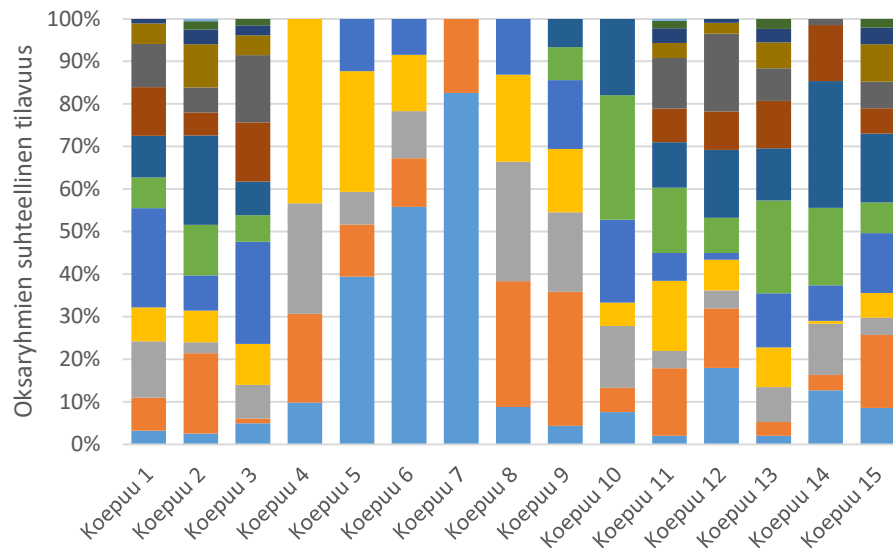
Kuva 6. Koepuun 14 mitatut pölkynpätäkät ja oksat.

Katkaisun jälkeen jokaisen pölkyn tyviläpimitta mitattiin elektronisilla mittasaksilla ristimittana pohjois-etelä- ja itä-länsi-suuntaisesti ja laskettiin niiden keskiarvo, jota käytettiin laskelmissa. Tyviläpimitan lisäksi mitattiin jokaisen pituus ja paino elektronisella vaa’alla. Kaikkien viidentoista koepuun rungot jaettiin yhteensä 343 osaan. Runkojen ositus koepuittain esitetään kuvassa (Kuva 7). Rungot osien määrät vaihtelivat pienimmän puun, koepuu 7, neljästä osasta isoimman puun, koepuu 11, 43 osaan.



Kuva 7. Koepuiden runkojen ositus.

Oksista mitattiin konehallilla jokaisen oksavälin oksien paino. Kaiken kaikkiaan kaikkien viidentoista koepuun oksat jaettiin 128 oksaryhmään ja niiden jakautuminen koepuiden välillä on kuvattu kuvassa (Kuva 8). Oksaryhmien määrät vaihtelivat pienimmän puun, koepuu 7, kahdesta osasta isoimman puun, koepuu 11, 13 osaan.



Kuva 8. Koepuiden oksien ositus ja niiden suhteellinen tilavuus kunkin koepuun oksien tilavuudesta.

2.3. Mittalaite

Mittalaitteena käytettiin Aalto-yliopistossa kehitettyä upotusmittalaitetta Volumeter (Torppala 2017-12-11) (Kuva 9). Se on uudistettu versio laitteesta, jota käytettiin ensimmäisen aineiston mittauksiin.

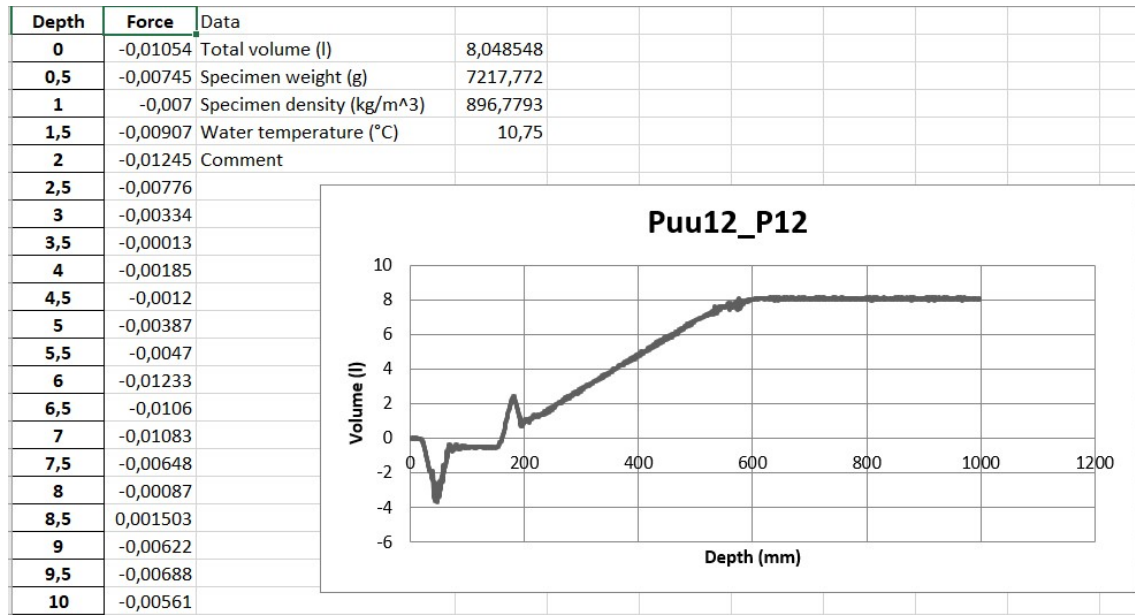


Kuva 9. Upotusmittalaite Volumeter mittaushäkkeineen.

2.4. Mittalaitteella tehdyt mittaukset

Mittalaitteella mitattiin toisen aineiston jokaisen puun jokainen pölkynpätke sekä jokaisen oksavälin oksat erikseen. Yhteensä tehtiin 160 onnistunutta upotusmittausta ja muutama epäonnistunut. Mittalaite tallensi jokaisessa mittauksessa kunkin kappaleen painon, tilavuuden, tiheyden sekä veden lämpötilan. Tilavuus tallennettiin litroina kuuden desimaalin tarkkuudella ja paino grammoina sekä veden lämpötila (°C) kolmen desimaalin tarkkuudella. Tiheys (kg/m^3) tallennettiin neljän desimaalin tarkkuudella. Mittalaite tallensi myös upotuksen aikana joka puolen senttimetrin välein upotussyvyyden (noin 2 000

mittausta per upotus) sekä kappaleen tilavuuden. Mittalaite tallensi kunkin upotusmittauksen tiedot Excel-tiedostoksi ja piirsi kuvaajan tilavuuden kehitymisestä upotussyvyyden suhteen (Kuva 10).



Kuva 10. Esimerkki upotusmittalaitteen Exceliin tallentamasta tiedosta koepuun 12 pölkyn numero 12 osalta.

2.5. Aineiston esikäsittely

Molemmista koepuueristä, sekä ensimmäisestä vuonna 2017 mitatuista 11 puusta ja toisesta vuonna 2020 mitatuista neljästä puusta, pyrittiin mittaamaan samat tunnuksat mahdollisimman samalla tavalla.

Molempien erien puista mitattiin puun pituus, ensimmäisen kuolleen oksan korkeus, ensimmäisen terveen oksan korkeus (latvusraja) ja rinnankorkeusläpimitta. Oksista mitattiin oksien läpimitat rungon tasolta, oksien pituus sekä oksien etäisyys tyveltä. Rungon osista mitattiin pituus sekä tyvipään ristikkäisläpimitta pohjois-etelä ja itä-länsi-suunnista.

Upotusmittaukset tehtiin kaikkien puiden latvuksien sekä koepuiden 1–2, 4–8 sekä 12–15 koko rungon osalta. Ensimmäisen koe-erän neljän kookkaimman puun runkoja ei mitauslaitteiston heikon kestävyysden takia mitattu (Hoppi 2018). Nämä olivat koepuut 3 sekä 9–11.

Neljän puun rungon upottamattomien osien tilavuudet laskettiin matemaattisesti Simpsonin kaavalla (kaava 2). Koepuista mitattiin ristiläpimitat parittomien prosenttien kohdilta suhteellisilta korkeuksilta.

$$V = \frac{\pi}{4} * (dx^2 + 4 * dy^2 + dz^2) * \frac{1}{6} * l, \quad (2)$$

jossa

dx = Rungon osan läpimitta tyvellä

dy = Rungon osan läpimitta keskellä

dz = Rungon osan läpimitta latvassa

l = Rungon osan pituus

Koepuiden 1–11 osalta upotusmittauksen kaikki tilavuustiedot osoittautuivat vääristyneiksi ja tilavuudet olivat liian pieniä, eikä niitä pystytty korjaamaan laskennallisesti (Hoppi 2018). Tämän takia koepuiden 1–11 runkojen osalta käytetään tilavuuksien osalta matemaattisesti laskettuja lukuja. Muiden kuin edellä mainittujen upottamattomien rungonosien kohdalla tilavuudet laskettiin katkaistun kartion kaavalla (kaava 3).

$$V = h * \frac{(A_1 + \sqrt{A_1 * A_2} + A_2)}{3}, \quad (3)$$

jossa

h = Rungon osan pituus

A_1 = Rungon osan poikkileikkausala tyvellä

A_2 = Rungon osan poikkileikkausala latvassa

Koepuiden 1–11 oksien osalta käytettiin mittalaitteen antamia tilavuuksia, vaikka ne ovat todennäköisesti aliarvioita. Hoppin tulkinnan mukaan oksien tilavuuksien pitäisi olla kuitenkin lähempänä todellista kuin rungon osalta (Hoppi 2018).

Koepuiden 12–15 osalta runkojen ja oksien upotusmittauksissa saatuja tilavuuksia käytettiin sellaisenaan.

Laskettaessa kaavoja puiden eri osille ja ominaisuuksille huomioitiin myös eri työvälineiden poistaman puun osuus. Työvälineinä käytettiin moottorisahaa, jonka teräketjun leveys oli 8 millimetriä, pokasahaa, jonka terän leveys oli 2 millimetriä, oksasahaa, jonka terän leveys oli 1 millimetri sekä oksasaksia, joka ei aiheuttanut hävikkiä. Työvälineen poistaman puun tilavuus laskettiin lieriön tilavuuden kaavalla (kaava 4) ja se lisättiin muihin mitattuihin tilavuuksiin kaavoja laskettaessa.

$$V = A * h, \tag{4}$$

jossa

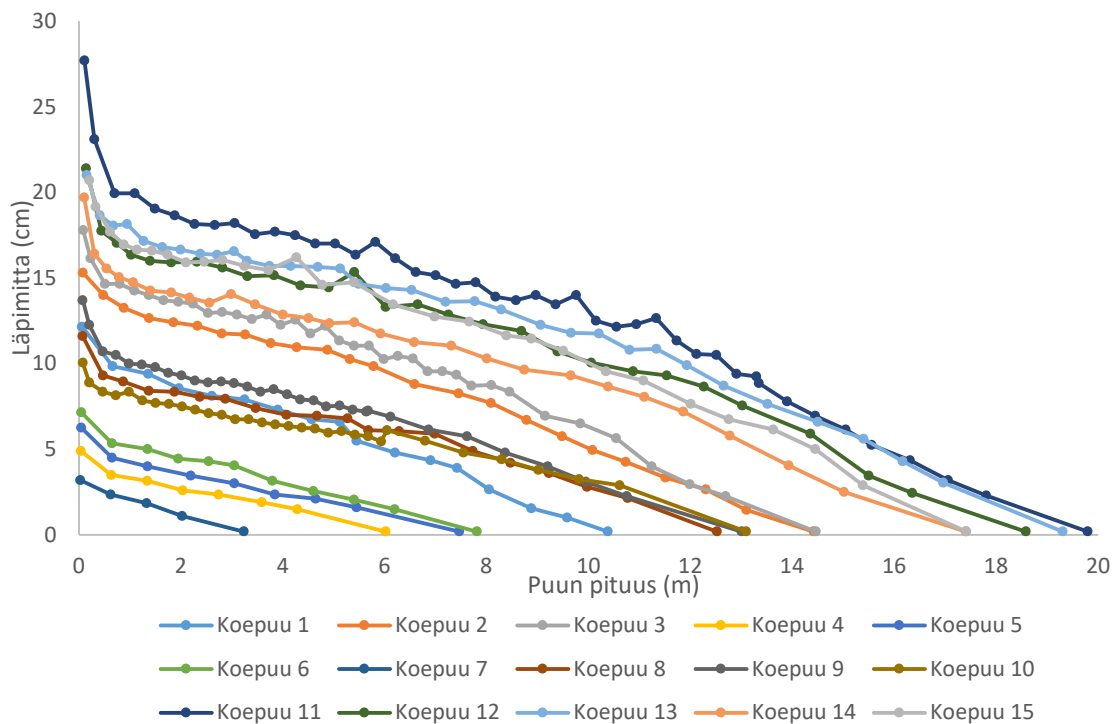
A = Katkaisukohdan poikkileikkauspinta-ala

h = Katkaisuun käytetyn työvälineen leveys

3. TULOKSET

3.1. Runkokäyrät kullekin puulle

Jokaisesta puusta mitattiin kunkin rungonosan pituus ja läpimitta ristiin kunkin rungonosan tyveltä. Ristikkäisläpimitat mitattiin pohjois-etelä- ja itä-länsi -suunnista. Näillä mitaustiedoilla saatiin piirrettyä kunkin puun runkokäyrä (Kuva 11). Kuten kuvasta (Kuva 11) nähdään, niin rungot kapenevat kohti latvaa, mutta se ei tapahdu tasaisesti ja joissain kohdissa runko jopa paksunee. Tämä johtuu muun muassa oksien aiheuttamista rungonmuotojen muutoksista sekä hieskoivujen runkojen luonnollisesta mutkikkuudesta, joka on havaittavissa myös kuvasta (Kuva 11).



Kuva 11. Koepuiden runkojen läpimitat (cm) eri puun pituuksilla (m).

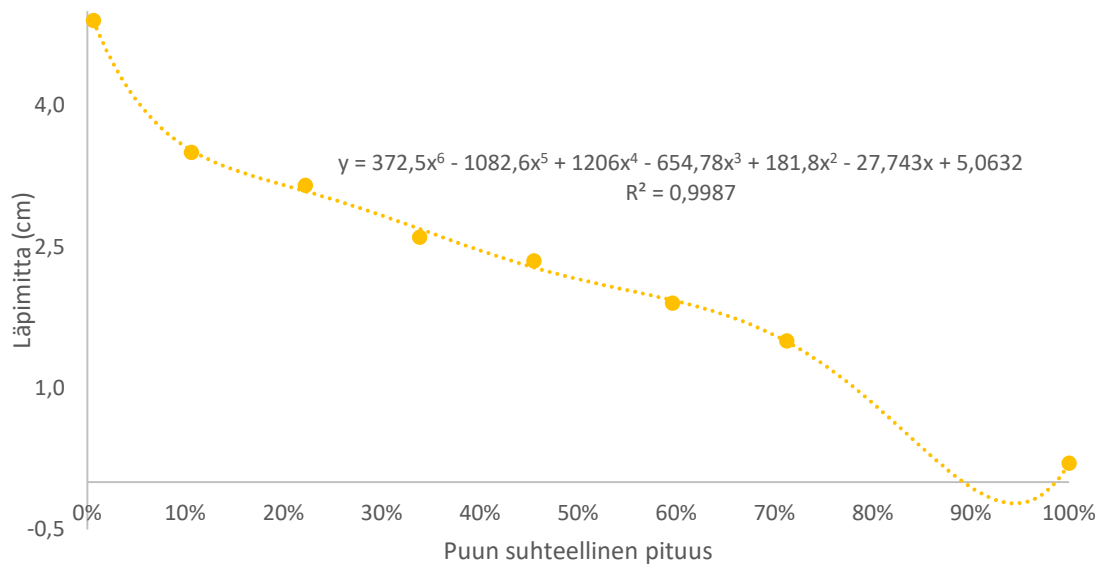
Seuraavaksi kunkin rungon läpimitat laskettiin puun suhteellisen pituuden mukaan (0–100 %) ja näiden pisteiden avulla laskettiin kullekin puulle oma runkokäyrä. Runkokäyrien laskemisessa hyödynnettiin Microsoft Excelin lisää trendiviiva -toimintoa, jolla saatiin runkokäyräksi 3–6 asteen polynomi. Sopivin polynomi valittiin R^2 -arvon sekä käyrän muodon perusteella. R^2 -arvo on selitysaste eli korrelaatiokertoimen neliö ja se

voi vaihdella 0 ja 1 (0 % ja 100 %) välillä. Se kertoo kuinka monta prosenttia selittävämuuttuja selittää selitettävän muuttujan varianssista. Kunkin rungon runkokäyrä ja käyrän R^2 -arvo on esitetty taulukossa (Taulukko 1).

Taulukko 5. Koepuiden runkokäyrämallit ja niiden R^2 -arvot.

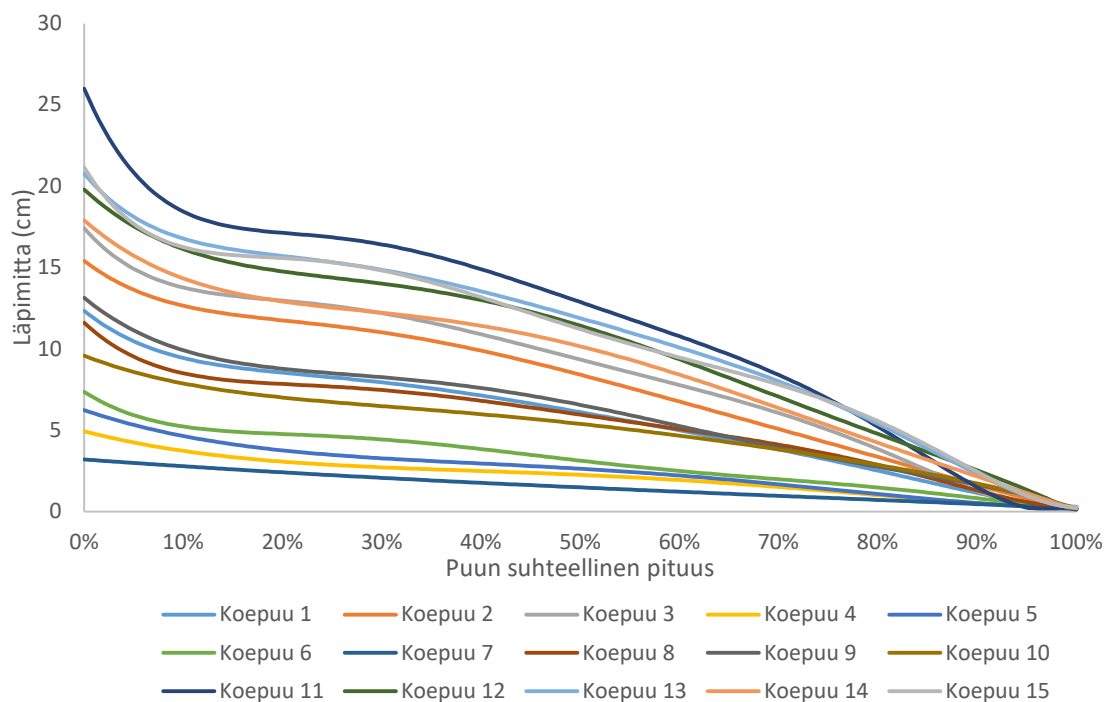
Koe- puu	Runkokäyrämallit	R^2 -arvo
1	$y = 287,39x^6 - 949,35x^5 + 1243,8x^4 - 815,61x^3 + 270,81x^2 - 49,086x + 12,343$	$R^2 = 0,9958$
2	$y = 238,78x^6 - 836x^5 + 1157,5x^4 - 789,11x^3 + 260,41x^2 - 46,826x + 15,414$	$R^2 = 0,999$
3	$y = 723,06x^6 - 2242,5x^5 + 2700,7x^4 - 1590,5x^3 + 461,07x^2 - 69,061x + 17,409$	$R^2 = 0,9943$
4	$y = 22,902x^4 - 53,967x^3 + 42,127x^2 - 15,798x + 4,9399$	$R^2 = 0,9948$
5	$y = 29,632x^4 - 68,941x^3 + 53,918x^2 - 20,63x + 6,2339$	$R^2 = 0,9914$
6	$y = 282,8x^6 - 958,99x^5 + 1257,9x^4 - 798,19x^3 + 248,79x^2 - 39,46x + 7,3675$	$R^2 = 0,9978$
7	$y = -1,1751x^3 + 2,6142x^2 - 4,4525x + 3,2065$	$R^2 = 0,9956$
8	$y = 438,43x^6 - 1417,8x^5 + 1791,8x^4 - 1119,7x^3 + 352,62x^2 - 56,742x + 11,604$	$R^2 = 0,9911$
9	$y = -161,27x^5 + 460,65x^4 - 481,64x^3 + 219,03x^2 - 49,758x + 13,138$	$R^2 = 0,9839$
10	$y = -48,69x^5 + 140,55x^4 - 158,25x^3 + 80,726x^2 - 23,719x + 9,5867$	$R^2 = 0,9848$
11	$y = 1287,5x^6 - 4051,2x^5 + 4988,8x^4 - 3040x^3 + 932,39x^2 - 143,08x + 26,007$	$R^2 = 0,9851$
12	$y = -165,75x^5 + 491,16x^4 - 531,56x^3 + 242,43x^2 - 56,12x + 19,807$	$R^2 = 0,9781$
13	$y = 610,92x^6 - 1924,6x^5 + 2371,1x^4 - 1447,6x^3 + 441,37x^2 - 71,723x + 20,767$	$R^2 = 0,9921$
14	$y = -115,66x^5 + 370,34x^4 - 433,14x^3 + 213,82x^2 - 53,187x + 17,91$	$R^2 = 0,9775$
15	$y = 1069,2x^6 - 3412,2x^5 + 4189,6x^4 - 2478,3x^3 + 709,91x^2 - 99,103x + 21,154$	$R^2 = 0,9897$

Osa käyristä alkoi oskilloida lähestyttäessä latvaa siirryttäessä korkeamman asteen polynomeihin ja ne käyrät hylättiin. Tätä ilmiötä kutsutaan Rungen ilmiöksi ja sitä voimisti latvan mittauspisteiden pitkät välit. Esimerkki Rungen ilmiöstä on esitetty kuvassa (Kuva 12).



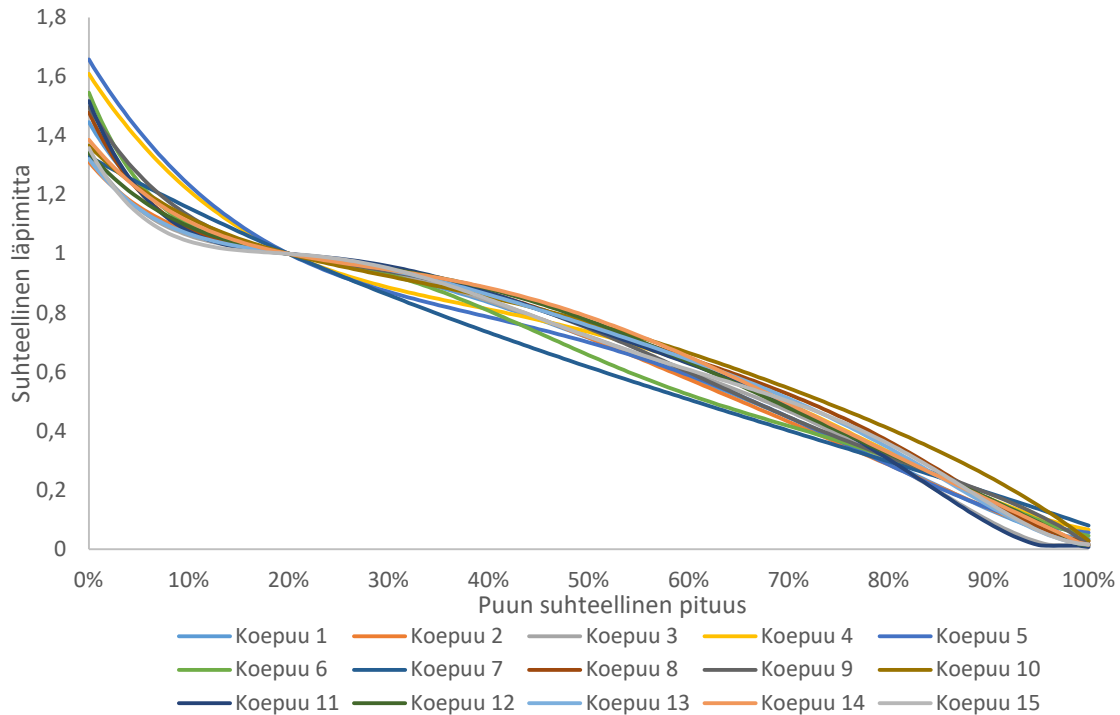
Kuva 12. Esimerkki Rungen ilmiöstä. Koepuun 4 runkokäyrä kuudennen asteen polynomina.

Kun kaikkien puiden suhteellisella pituudella normalisoidut runkokäyrät laitetaan samaan kuvaan (Kuva 13), havainnollistuu puiden muotojen samankaltaisuus selkeämmin kuin todellisia pituuksia käyttäen.



Kuva 13. Koepuiden läpimitat (cm) puun eri suhteellisilla pituuksilla kunkin puun runkokäyrällä esitetynä.

Kun puiden pituuksien suhteellistamisen lisäksi suhteutetaan läpimitat siten, että jokaisen puun läpimitta 20 % korkeudella on 1 saadaan kokonaisuus, jonka avulla voidaan määrittää yhteinen runkokäyrä (Kuva 14). Samaa lähestymistapaa on käytetty myös Laasasenahon runkokäyrissä (Laasasenaho 1982).



Kuva 14. Koepuiden runkojen suhteelliset läpimitat puun eri suhteellisilla pituuksilla kunkin puun runkokäyrällä esitettynä. Kaikkien puiden suhteellinen läpimitta 20 % korkeudella on 1.

3.2. Yhteinen runkokäyrä koepuiden runkokäyristä

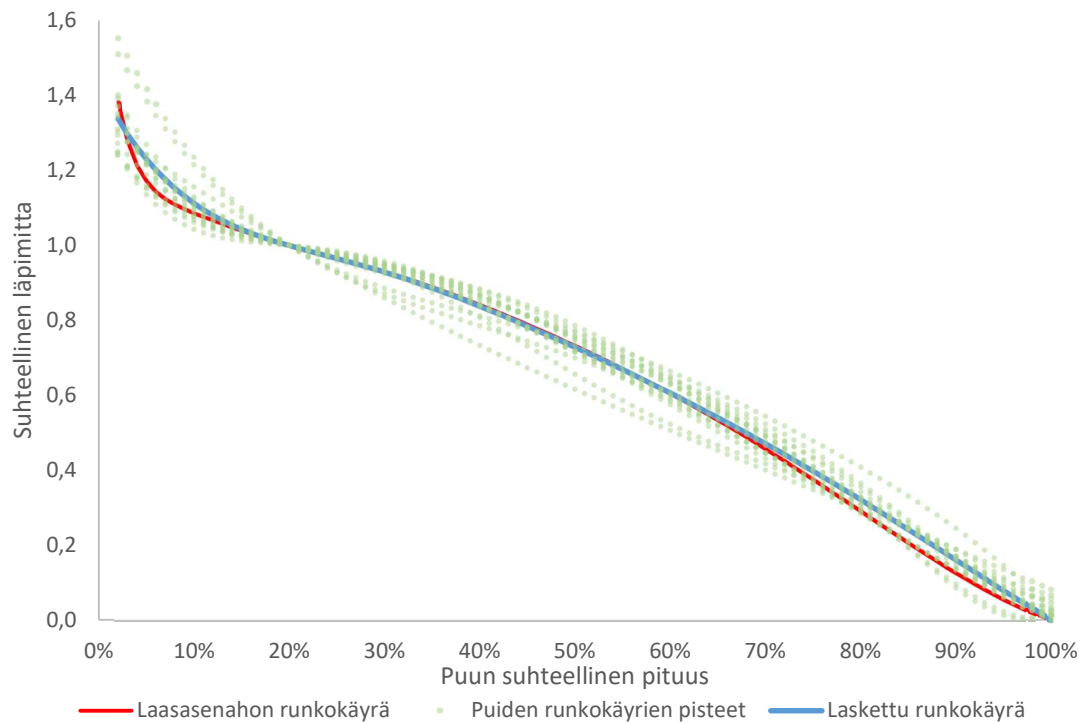
Koko koeaineiston yhteinen runkokäyrä laskettiin hyödyntämällä kunkin puun omaa runkokäyrää. Kunkin puun omilla runkokäyrillä laskettiin jokaiselle puulle suhteellinen läpimitta suhteellisilla pituuksilla prosentin välein. Näin saatiin jokaiselle puulle 100 datapistettä ja koko koeaineistoon 1 500 datapistettä. Näiden datapisteiden pohjalta laskettiin oma yhteinen runkokäyrä, jonka malliksi valittiin Laasasenahon (Laasasenaho 1982) käyttämä Fibonaccin lukusarjaa polynomin asteissa hyödyntävä polynomi (Kaava 1). Laskennassa hyödynnettiin Microsoft Excelin Solver lisäosaa, jonka avulla käyrästä saatiin mahdollisimman hyvin datapisteitä mallintava käyrä minimoimalla datapisteiden ja oman mallin antamien tulosten erotusten neliön summan neliöjuuri eli (root mean squared error, RMSE). RMSE koepuiden yhteisellä kaavalla on 2,608 ja samalla aineistolla Laasasenahon runkokäyrällä laskettuna RMSE on 3,645.

Keskineliövirheen neliöjuurta minimoimalla saatiin kaavan 1 kertoimiksi taulukossa (Taulukko 6) esitetyt kertoimet.

Taulukko 6. Yhteisen runkokäyrän kertoimet.

Kerroin	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8
Kertoimen arvo	1,583198	0,571429	-2,28325	2,986224	-3,61393	3,207616	-1,30239	0,292177

Kun datapisteet, Laasasenahon runkokäyrä ja laskettu runkokäyrä esitetään samassa kuvassa (Kuva 15) huomataan käyrien eroavan lähinnä puun tyvessä ja latvassa. Kuvasta esitetty datapisteet 2 %–100 % suhteellisilla pituuksilla.



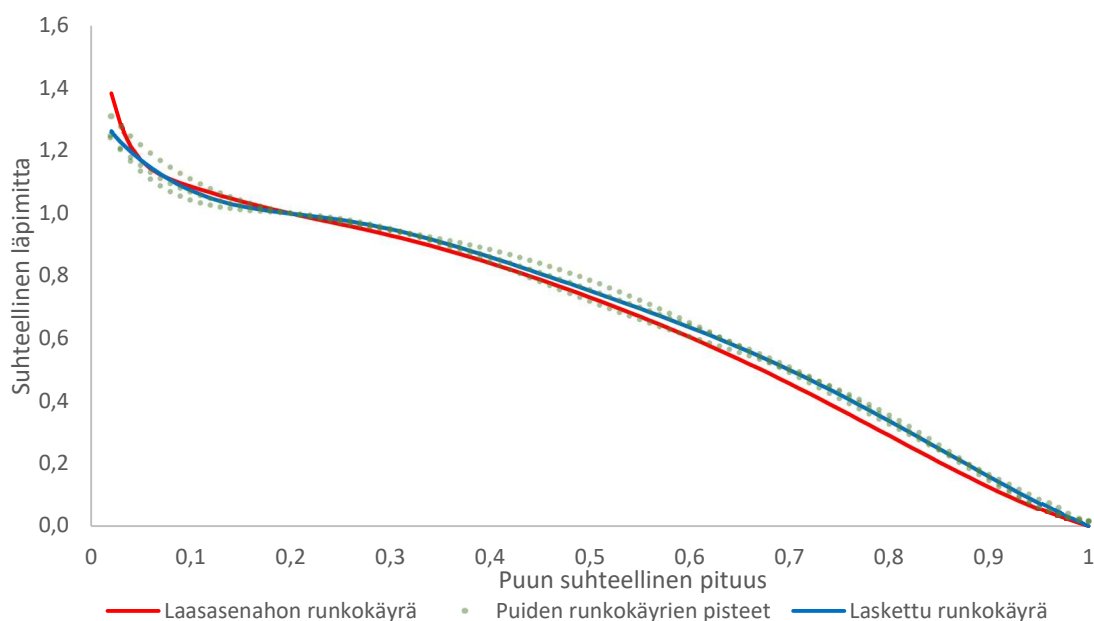
Kuva 15. Kaikkien koepuiden yhteinen runkokäyrä. Punaisella yhtenäisellä viivalla on esitetty Laasasenahon runkokäyrä ja sinisellä yhtenäisellä viivalla laskettu runkokäyrä. Laskennassa käytetyt datapisteet on esitetty vihreillä pisteillä.

Kun vastaava, mikä edelle tehtiin kaikille koepuille tehdään vain kolmelle koepuulle, koepuille 13–15, saadaan lasketulle runkokäyrälle luonnollisesti eri kertoimet, jotka on esitetty taulukossa (Taulukko 7). Vuoden 2020 aineistosta jätettiin koepuu 12 pois, koska se oli kaksiahaarainen. Kolmen puun runkokäyrä, datapisteet ja Laasasenahon runkokäyrä on esitetty kuvassa (Kuva 16). Siinä Laasasenahon runkokäyrä ja laskettu runkokäyrä

eroavat toisistaan huomattavasti vähemmän tyvipäässä, mutta keskiosassa ja latvassa selkeämmin.

Taulukko 7. Kolmen koepuun runkokäyrän kertoimet

Kerroin	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8
Kertoimen arvo	1,388293	2,944157	-7,52563	9,683513	-10,0356	7,182508	-2,87574	0,597095



Kuva 16. Kolmen koepuun, koepuut 13–15, yhteinen runkokäyrä. Punaisella yhtenäisellä viivalla on esitetty Laasasenahon runkokäyrä ja sinisellä yhtenäisellä viivalla laskettu runkokäyrä. Laskennassa käytetyt datapisteet on esitetty vihreillä pisteillä.

3.3. Yhteinen runkokäyrä suhteellisen läpimitan perusteella

Yhteinen runkokäyrä laskettiin myös käyttämällä manuaalisissa mittauksissa saatuja läpimittoja siten, että kunkin puun läpimitat suhteutettiin siten, että läpimitaksi 20 % korkeudella määritettiin yksi. Tämä tehtiin laskemalla luvussa 3.1. saaduista runkokäyristä kunkin puun laskennallinen läpimitta 20 % korkeudella ja jakamalla mittaustulokset sillä. Pituuden osalta käytettiin suhteellista pituutta samalla tavoin kuten aiemminkin.

Näiden datapisteiden pohjalta laskettiin runkokäyrät, joiden malliksi valittiin edellisen luvun tapaan Laasasenahon (Laasasenaho 1982) käyttämä Fibonaccin lukusarjaa polynomin asteissa hyödyntävä polynomi (Kaava 1). Runkokäyrät laskettiin sekä kaikilla koepuilla, että vain koepuilla 12–15.

RMSE kaikkien koepuiden läpimittojen avulla lasketun runkokäyrän kaavalla on 0,504 ja samalla aineistolla Laasasenahon runkokäyrällä laskettuna RMSE on 1,185.

RMSE koepuiden 12–15 läpimittojen avulla lasketun runkokäyrän kaavalla on 0,072 ja samalla aineistolla Laasasenahon runkokäyrällä laskettuna RMSE on 0,403.

Keskineliövirheen neliöjuurta minimoimalla saatiin kaavan 1 kertoimiksi taulukoissa (Taulukko 8 ja Taulukko 9) esitetyt kertoimet.

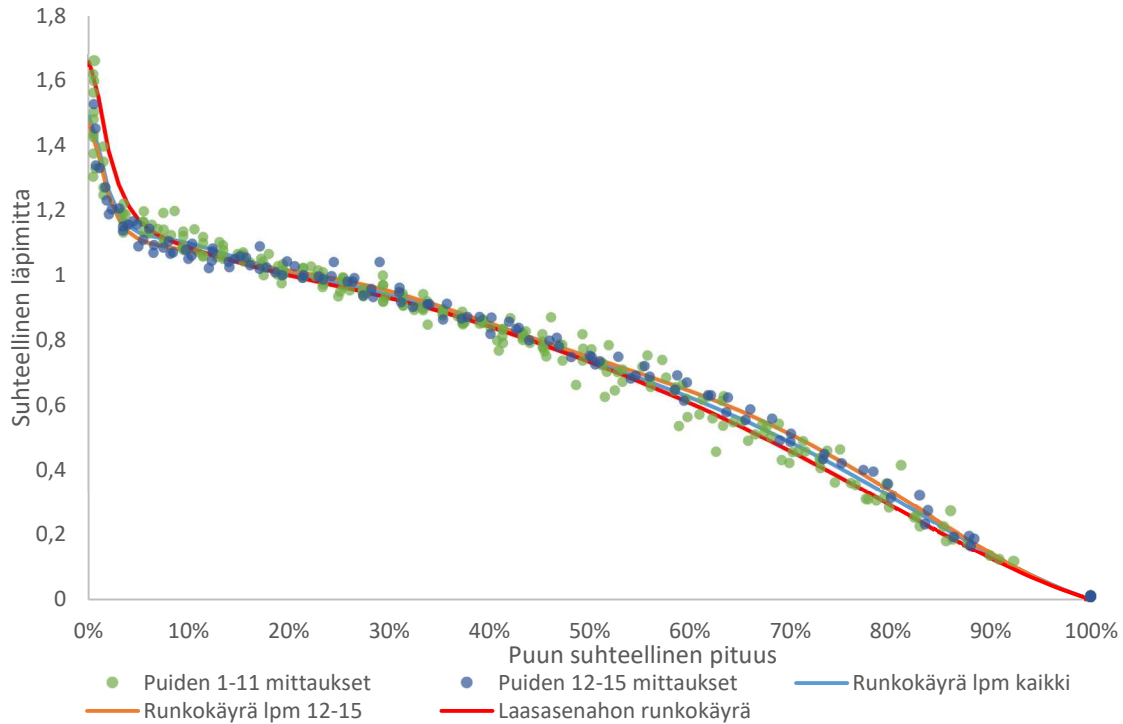
Taulukko 8. Kaikkien koepuiden läpimittojen avulla lasketun runkokäyrän kertoimet.

Kerroin	Kertoimen arvo
b_1	0,997437406
b_2	5,109314448
b_3	-11,35176201
b_4	13,94481479
b_5	-14,2792721
b_6	11,81048629
b_7	-7,640486881
b_8	3,024103159

Taulukko 9. Koepuiden 12–15 läpimittojen avulla lasketun runkokäyrän kertoimet.

Kerroin	Kertoimen arvo
b_1	0,892581391
b_2	6,88547458
b_3	-15,70855664
b_4	19,781479
b_5	-19,36195768
b_6	14,08101768
b_7	-7,844799055
b_8	2,858823884

Kaikkien koepuiden mitattujen läpimittojen avulla laskettu runkokäyrä, koepuiden 12–15 mitattujen läpimittojen avulla laskettu runkokäyrä, Laasasenahon runkokäyrä sekä laskennassa käytetyt mittauspisteet on esitetty kuvassa (Kuva 17). Siinä Laasasenahon runkokäyrä ja laskettu runkokäyrä eroavat toisistaan huomattavasti vähemmän tyvipäässä, mutta keskiosassa ja latvassa selkeämmin.



Kuva 17. Mitattujen läpimittojen avulla lasketut runkokäyrät. Punaisella yhtenäisellä viivalla on esitetty Laasasenahon runkokäyrä, sinisellä yhtenäisellä viivalla kaikkien koepuiden läpimitoista laskettu runkokäyrä ja oranssilla yhtenäisellä viivalla koepuiden 12–15 läpimitoista laskettu runkokäyrä. Laskennassa käytetyt datapisteet on esitetty pisteillä (vihreä koepuut 1–11, sininen koepuut 12–15).

3.4. Runkokäyrän laskeminen suhteellisen runkokäyrän avulla

Runkokäyrästä, joka on esitetty edellä kuvatun kaltaisesti puun suhteellisen läpimitan ja suhteellisen pituuden avulla voidaan laskea todellinen runkokäyrä, jos tiedetään puun pituus ja läpimitta jollain korkeudella. Tämä tapahtuu ratkaisemalla d_{2h} :n estimaatti sijoittamalla kaavaan 1 d_l :n paikalle mitattu läpimitta ja l :n paikalle läpimitan mittauskorkeus (Laasasenaho 1996). Merkitsemällä kaava 1 $f(x)$:ksi ja d_{2h} :n estimaatti de_{2h} :ksi saadaan runkokäyrälle yhtälö

$$d_l = de_{2h} * f(x) \quad (5)$$

3.5. Rungon kumulatiivinen suhteellinen tilavuuskäyrä

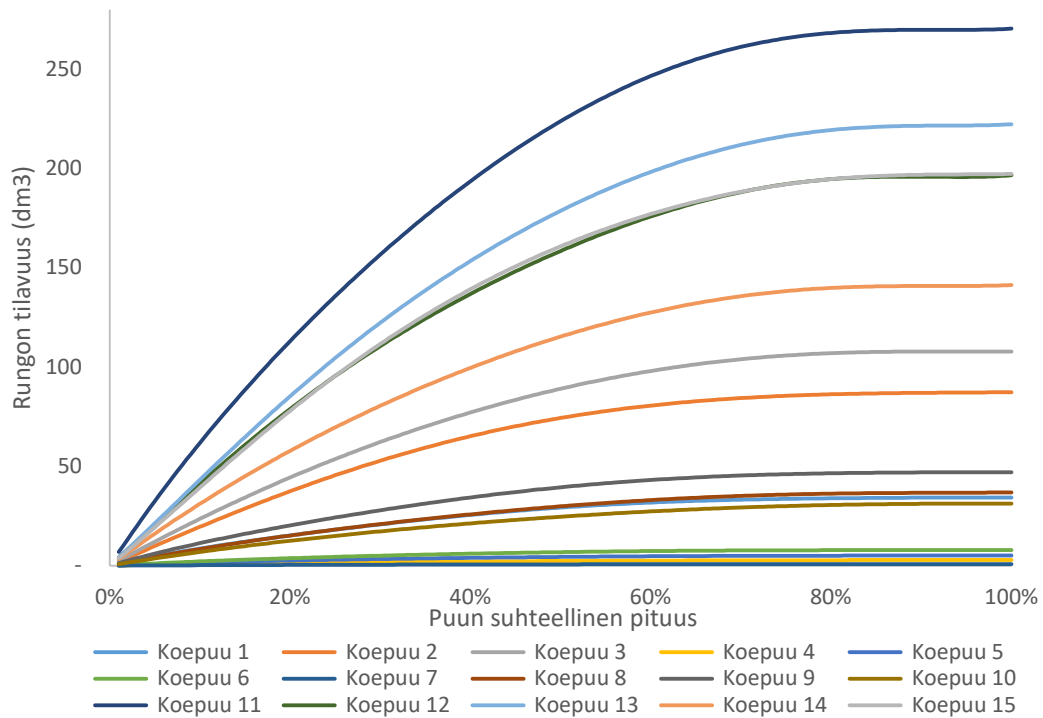
Rungon kumulatiivinen tilavuuskäyrä laskettiin samoilla periaatteilla kuin luvussa 3.2. laskettu runkokäyrä. Lähtötietoina käytettiin koepuiden 1–11 osalta matemaattisesti laskettuja runkojen tilavuutta ja koepuiden 12–15 osalta upotusmittauksissa saatuja tilavuuksia.

Ensin laskettiin kustakin puusta oma rungon kumulatiivinen tilavuuskäyrä suhteelliseen pituuteen nähden ja näiden pisteiden avulla laskettiin kullekin puulle oma kumulatiivinen tilavuuskäyrä. Kumulatiivisten tilavuuskäyrien laskemisessa hyödynnettiin Microsoft Excelin lisää trendiviiva -toimintoa, jolla saatiin runkokäyriksi 3–6 asteen polynomeja. Sopivin polynomi valittiin R^2 -arvon sekä käyrän muodon perusteella kuten runkokäyrien osalta edelle. Käyrät pakotettiin saamaan arvo 0, kun suhteellinen pituus oli 0 %. Puukohtaiset kumulatiiviset tilavuuskäyrät ja niiden R^2 -arvot on esitetty taulukossa (Taulukko 10).

Taulukko 10. Koepuiden puukohtaiset runkojen kumulatiiviset tilavuuskäyrämallit ja niiden R^2 -arvot.

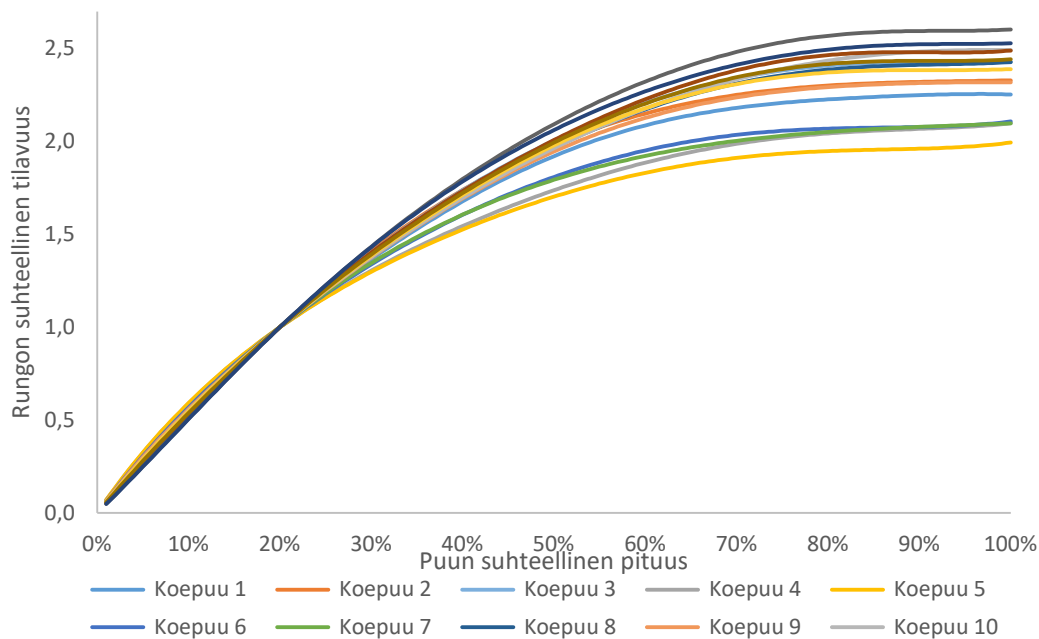
Koe-puu	Kumulatiivinen tilavuuskäyrä	R^2 -arvo
1	$y = -277,99x^6 + 918,29x^5 - 1135,8x^4 + 661,98x^3 - 236,92x^2 + 104,76x$	$R^2 = 0,9997$
2	$y = -59,459x^5 + 248,41x^4 - 290,46x^3 - 10,405x^2 + 199,28x$	$R^2 = 0,9995$
3	$y = 164,97x^6 - 399,54x^5 + 375,17x^4 - 174,16x^3 - 106,48x^2 + 247,95x$	$R^2 = 0,9999$
4	$y = 10,301x^5 - 28,758x^4 + 31,301x^3 - 19,68x^2 + 9,6836x$	$R^2 = 1$
5	$y = 20,588x^5 - 55,992x^4 + 60,196x^3 - 38,201x^2 + 18,563x$	$R^2 = 0,9998$
6	$y = 22,598x^5 - 55,808x^4 + 55,086x^3 - 38,705x^2 + 24,763x$	$R^2 = 0,9998$
7	$y = 0,8087x^3 - 2,3315x^2 + 2,3102x$	$R^2 = 1$
8	$y = 89,209x^5 - 220,52x^4 + 198,69x^3 - 125,17x^2 + 94,693x$	$R^2 = 1$
9	$y = -211,94x^6 + 737,97x^5 - 954,93x^4 + 580,8x^3 - 236,98x^2 + 132,14x$	$R^2 = 0,9999$
10	$y = 36,62x^5 - 102,06x^4 + 107,97x^3 - 88,028x^2 + 76,779x$	$R^2 = 0,9999$
11	$y = 619,63x^5 - 1462,9x^4 + 1239,6x^3 - 815,87x^2 + 690,01x$	$R^2 = 1$
12	$y = 1303,6x^6 - 3699,3x^5 + 3920,3x^4 - 1899,7x^3 + 158,59x^2 + 413,16x$	$R^2 = 1$
13	$y = 1007,2x^6 - 3007,1x^5 + 3539,7x^4 - 2091,2x^3 + 358,82x^2 + 414,92x$	$R^2 = 1$
14	$y = 340,68x^6 - 761,57x^5 + 539,37x^4 - 86,324x^3 - 225,39x^2 + 334,58x$	$R^2 = 1$
15	$y = 773,19x^6 - 2506,8x^5 + 3251,8x^4 - 2088x^3 + 394,7x^2 + 372,44x$	$R^2 = 0,9999$

Kun kaikkien puiden kumulatiiviset runkojen tilavuuskäyrät laitetaan samaan kuvaan, havainnollistuu tilavuuden samankaltainen käyttäytyminen, mutta pienempien puiden osalta kumulatiiviset tilavuudet jäävät niin pieniksi, että niitä on vaikea hahmottaa (Kuva 18).



Kuva 18. Kaikkien puiden kumulatiiviset runkojen tilavuuskäyrät puun suhteelliseen pituuteen nähden.

Tämän jälkeen tilavuudet suhteutettiin siten, että rungon tilavuuden arvoksi 20 % korkeudella asetettiin 1. Näin hahmotetaan puiden erilainen kumulatiivinen tilavuuden kehitys (Kuva 19).



Kuva 19. Kaikkien koepuiden runkojen suhteelliset tilavuudet puun eri suhteellisilla pituuksilla kunkin puun kumulatiivisilla tilavuuskäyrillä esitettynä. Kaikkien puiden suhteellinen tilavuus 20 % korkeudella on 1.

Suhteellisten tilavuustietojen avulla saatiin jälleen laskettua 1 500 datapistettä, josta voitiin laskea yhteinen kumulatiivinen tilavuuskäyrä. Käyrä kuudennen asteen polynomi, joka pakotettiin saamaan arvo 0, kun suhteellinen pituus oli 0 %. Tuloksena saatiin suhteellisen tilavuuden kumulatiivinen kaava. Kaava ja datapisteet on esitetty kuvassa (Kuva 20).

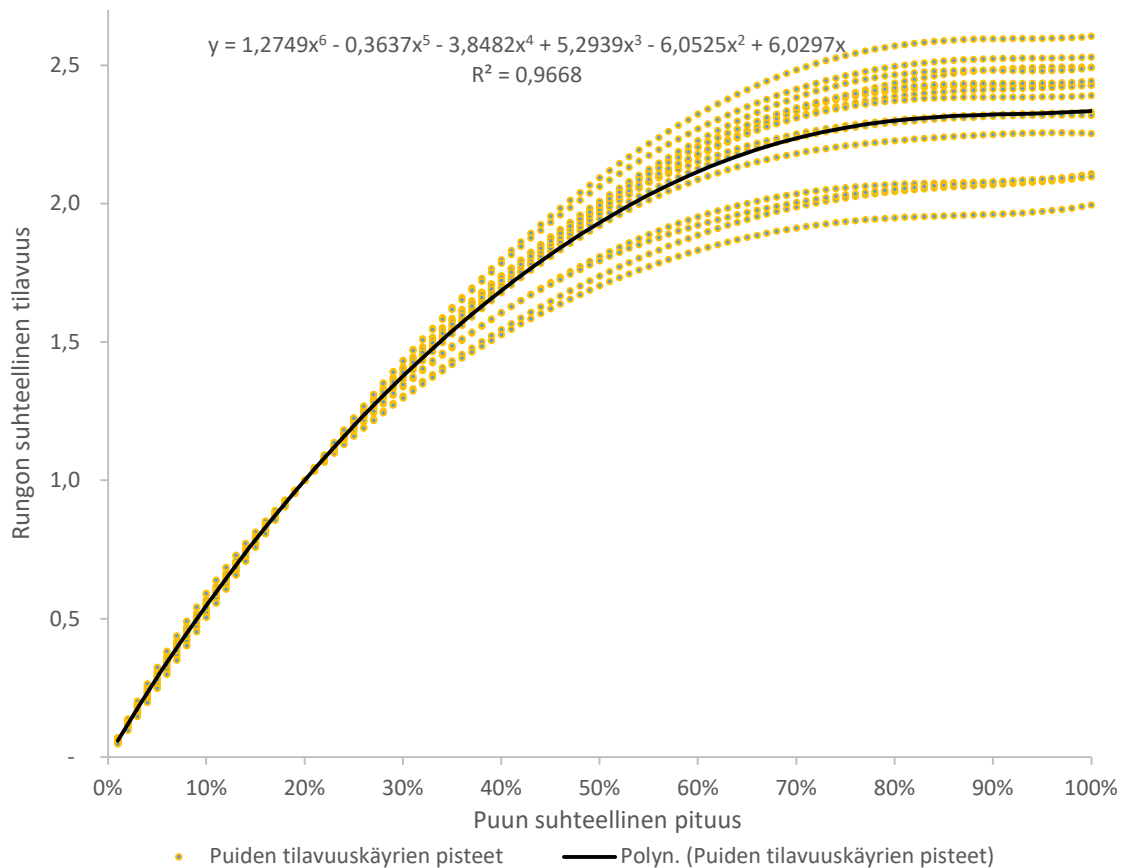
$$RV(x) = y = \frac{V_l}{V_{2h}} = 1,2749x^6 - 0,3637x^5 - 3,8482x^4 + 5,2939x^3 - 6,0525x^2 + 6,0297x, \quad (6)$$

jossa

V_l = läpimitta korkeudella l maasta

V_{2h} = läpimitta 20 %:n korkeudella

$x = l/h$ eli suhteellinen etäisyys tyvestä.



Kuva 20. Kaikkien koepuiden yhteinen kumulatiivinen rungon tilavuuskäyrä. Mustalla yhtenäisellä viivalla on esitetty laskettu yhteinen kumulatiivinen tilavuuskäyrä. Laskennassa käytetyt datapisteet on esitetty oransseilla pisteillä. Kuvassa myös yhtälön kaava ja sen R^2 -arvo.

Vastaava kumulatiivinen tilavuuskäyrä laskettiin myös koepuille 13–15. Suhteellisten tilavuustietojen avulla laskettiin 300 datapistettä, josta voitiin laskea yhteinen kumulatiivinen tilavuuskäyrä. Käyrä on kuudennen asteen polynomi, joka pakotettiin saamaan arvo 0, kun suhteellinen pituus oli 0 %. Tuloksena saatiin suhteellisen tilavuuden kumulatiivinen kaava (Kaava 7). Kaava ja datapisteet on esitetty kuvassa (Kuva 21).

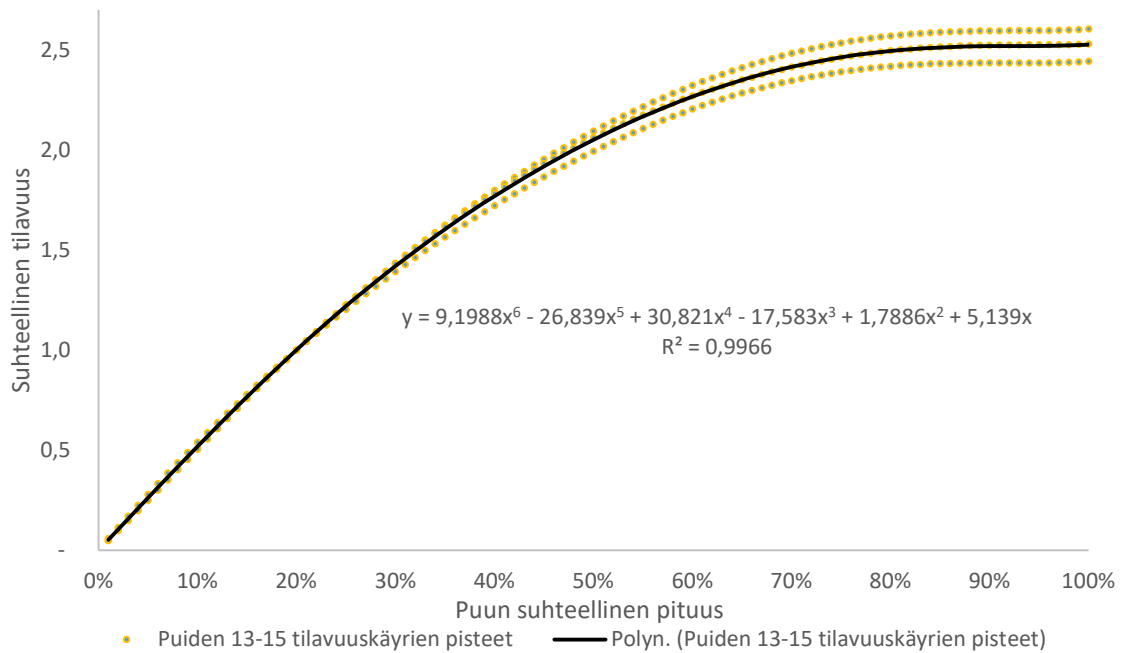
$$RV_{1215}(x) = y = \frac{V_l}{V_{.2h}} = 9,1988x^6 - 26,839x^5 + 30,821x^4 - 17,583x^3 + 1,7886x^2 + 5,139x, \quad (7)$$

jossa

V_l = läpimitta korkeudella l maasta

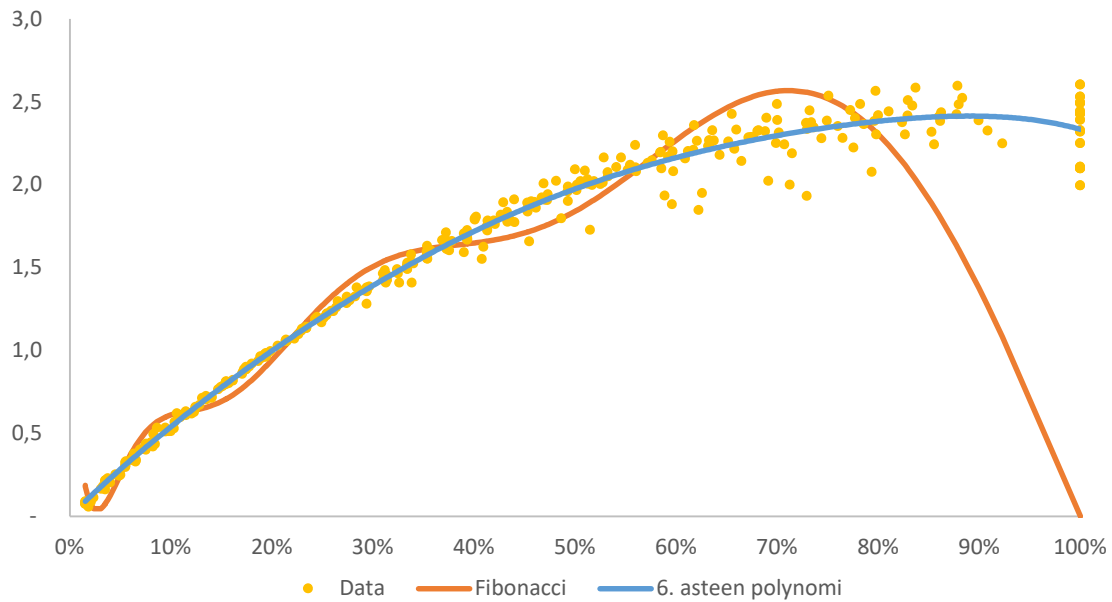
$V_{.2h}$ = läpimitta 20 %:n korkeudella

$x = l/h$ eli suhteellinen etäisyys tyvestä.



Kuva 21. Koepuiden 13–15 kumulatiivinen rungon tilavuuskäyrä. Mustalla yhtenäisellä viivalla on esitetty laskettu kumulatiivinen tilavuuskäyrä. Laskennassa käytetyt datapisteet on esitetty oransseilla pisteillä. Kuvassa myös yhtälön kaava ja sen R^2 -arvo.

Rungon kumulatiivista tilavuuskäyrää yritettiin laskea myös samalla tavalla kuin runkokäyrää luvussa 3.3. hyödyntämällä rungon tilavuuden mittauksia, siten että tilavuudeksi 20 % korkeudella määriteltiin yksi. Tämä tehtiin laskemalla taulukossa 10 esitetyistä puukohtaisista tilavuuskäyristä kunkin puun laskennallinen tilavuus 20 % korkeudella ja jakamalla mittaustulokset sillä. Pituuden osalta käytettiin suhteellista pituutta samalla tavoin kuten aiemminkin. Näiden datapisteiden pohjalta laskettiin tilavuuskäyrä, jonka malliksi valittiin runkokäyrien tapaan Fibonaccin lukusarjaa hyödyntävä polynomi. Tällä laskennalla ja samalla datalla tehtyä 6. asteen polynomikäyrää ei saatu järkevästi käyttäytyväksi. Tämä johtui latvan harvemmista mittauspisteistä. Molemmat on esitetty kuvassa (Kuva 22).



Kuva 22. Kumulatiiviset rungon tilavuuskäyrät. Oranssilla yhtenäisellä viivalla on esitetty Fibonaccin lukusarjalla laskettu kumulatiivinen tilavuuskäyrä ja sinisellä Excelin 6. asteen polynomitrendikäyrä. Laskennassa käytetyt datapisteet on esitetty keltaisilla pisteillä.

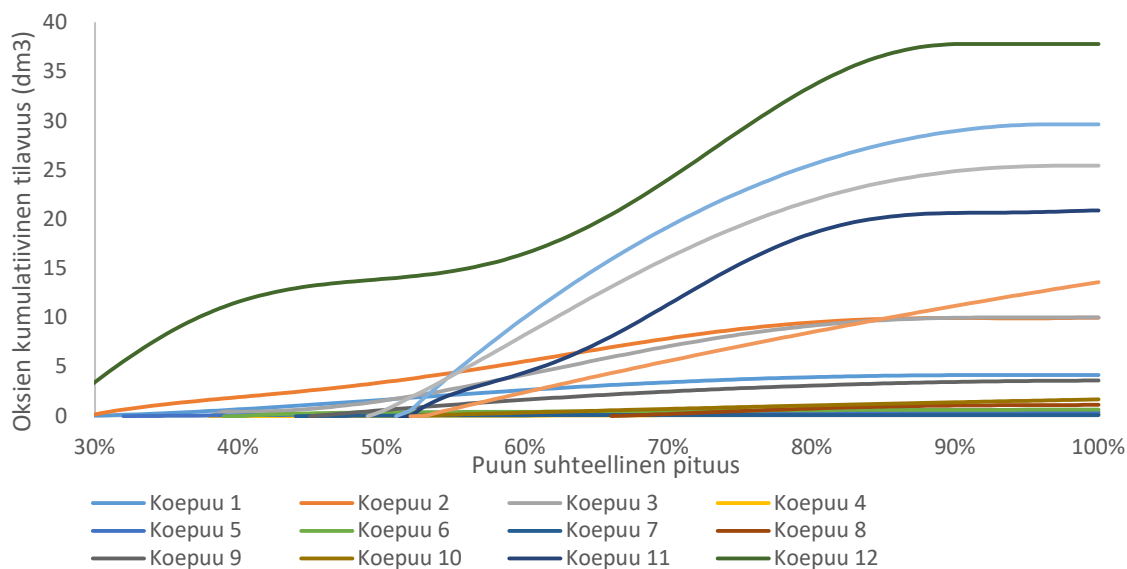
3.6. Oksien suhteellinen tilavuuskäyrä

Oksien kumulatiivinen tilavuuskäyrä laskettiin samoilla periaatteilla kuin luvussa 3.2. lasketut runkokäyrät. Lähtötietoina käytettiin upotusmittauksissa saatuja tilavuuksia. Koepuiden 1–11 osalta vääristyneitä tuloksia hyödynnettiin, koska absoluuttiset luvut muutettiin suhteellisiksi luvuiksi.

Ensin laskettiin kullekin puulle oma oksien kumulatiivinen tilavuuskäyrä suhteelliseen pituuteen nähden ja näiden pisteiden avulla laskettiin kullekin puulle oma kumulatiivinen tilavuuskäyrä. Kumulatiivisten tilavuuskäyrien laskemisessa hyödynnettiin Microsoft Excelin lisää trendiviiva -toimintoa, jolla saatiin runkokäyriksi 3–6 asteen polynomeja. Sopivin polynomi valittiin R^2 -arvon sekä käyrän muodon perusteella. Puukohtaiset kumulatiiviset tilavuuskäyrät ja niiden R^2 -arvot on esitetty kuvassa ja taulukossa (Taulukko 11 ja kuva 23).

Taulukko 11. Puukohtaiset oksien kumulatiivisten tilavuuskäyrät ja niiden R²-arvot kertoimet.

Koe-puu	Oksien kumulatiivinen tilavuuskäyrä	R ² -arvo
1	$y = 41,958x^4 - 126,84x^3 + 127,99x^2 - 43,63x + 4,7077$	R ² = 0,9895
2	$y = 735,76x^5 - 2394,6x^4 + 2948,7x^3 - 1713,1x^2 + 487,08x - 53,757$	R ² = 0,9919
3	$y = 306,28x^5 - 829x^4 + 676,47x^3 - 76,641x^2 - 91,06x + 23,935$	R ² = 0,9904
4	$y = -1,7059x^3 + 3,5854x^2 - 2,0622x + 0,3758$	R ² = 1
5	$y = 1,3289x^3 - 3,4246x^2 + 3,1972x - 0,72$	R ² = 0,9437
6	$y = -267,86x^6 + 1302,9x^5 - 2590,8x^4 + 2693,5x^3 - 1543,6x^2 + 463,08x - 56,546$	R ² = 0,9999
7	$y = -2,7238x^4 + 9,795x^3 - 13,182x^2 + 7,8927x - 1,6533$	R ² = 1
8	$y = 204x^4 - 688,27x^3 + 853,52x^2 - 457,32x + 89,221$	R ² = 1
9	$y = -11,603x^2 + 23,43x - 8,2096$	R ² = 0,9751
10	$y = -1,4106x^2 + 5,6227x - 2,5045$	R ² = 0,9542
11	$y = -44735x^6 + 210733x^5 - 407726x^4 + 414242x^3 - 232925x^2 + 68771x - 8339,1$	R ² = 0,9925
12	$y = 12878x^6 - 47464x^5 + 69070x^4 - 50338x^3 + 19186x^2 - 3537,5x + 243,58$	R ² = 0,9931
13	$y = -144,44x^2 + 279,73x - 105,79$	R ² = 0,9857
14	$y = -12,895x^2 + 48,584x - 22,078$	R ² = 0,9203
15	$y = 524,66x^4 - 1711x^3 + 1944x^2 - 855,59x + 123,36$	R ² = 0,997



Kuva 23. Koepuiden oksien kumulatiiviset tilavuuskäyrät puun suhteelliseen pituuteen nähden.

Sitten käyrät suhteutettiin latvuksen pituuden suhteen ja siten, että kunkin latvuksen suhteellinen tilavuus on 1. Näin saadun pistejoukon avulla laskettiin oksien yhteinen kumulatiivinen tilavuuskäyrä. Käyrä on viidennen asteen polynomi, joka pakotettiin saamaan

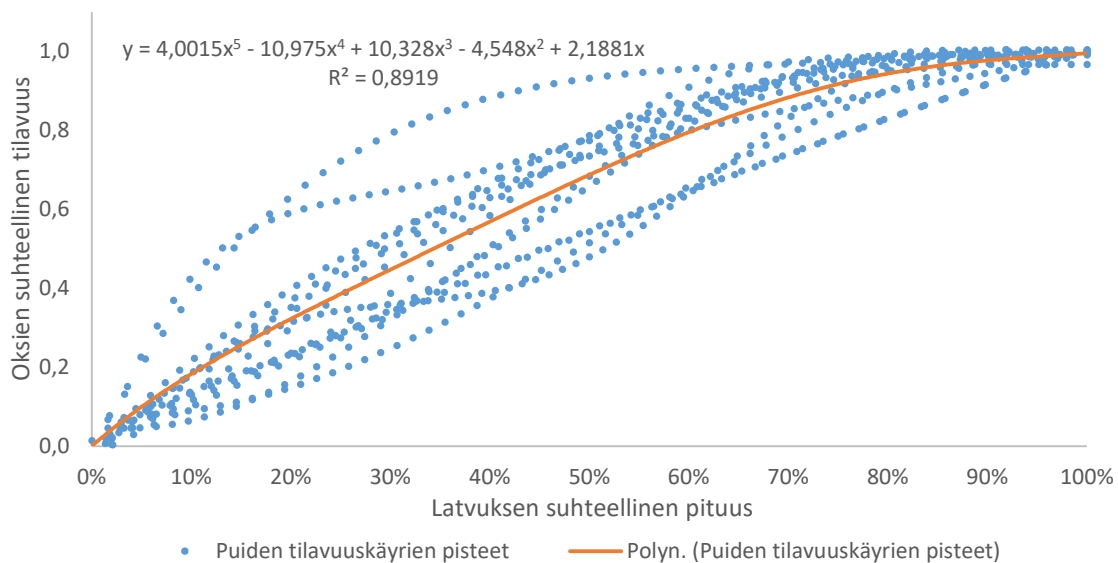
arvo 0, kun latvuksen suhteellinen pituus on 0 %. Tuloksena saatiin suhteellisen tilavuuden kumulatiivinen kaava. Kaava ja datapisteet on esitetty alla (kaava 8 ja Kuva 24).

$$OV(sh) = 4,0015sh^5 - 10,975sh^4 + 10,328sh^3 - 4,548sh^2 + 2,1881sh, \quad (8)$$

jossa

$sh = 5/3x - 2/3$ (kun $sh \geq 0,4$) = latvuksen suhteellinen pituus, jossa x puun suhteellinen pituus.

Kun $sh < 0,4$ $OV(x) = 0$.



Kuva 24. Oksien suhteellinen kumulatiivinen tilavuuskäyrä ja koepuiden tilavuuskäyrien pisteet. Oranssilla yhtenäisellä viivalla on esitetty oksien kumulatiivinen tilavuuskäyrä. Laskennassa käytetyt datapisteet on esitetty sinisillä pisteillä. Kuvassa myös yhtälön kaava ja sen R^2 -arvo.

Oksien tilavuus latvuksen suhteellisella pituudella lasketaan kertomalla oksien suhteellisen kumulatiivisen tilavuuden kaava puun rungon tilavuudella ja vakiokertoimella. Vakiokerroin on koepuiden 12–15 perusteella on 14,8 %.

3.7. Koko puun suhteellinen tilavuuskäyrä

Koko puun tilavuus laskettiin samoilla periaatteilla kuin rungon tilavuus luvussa 0. Lähtötietoina käytettiin koepuiden 1–11 osalta matemaattisesti laskettuja runkojen tilavuutta ja oksien osalta upotusmittauksissa saatuja tilavuuksia. Koepuiden 12–15 osalta käytettiin upotusmittauksissa saatuja tilavuuksia.

Ensin laskettiin kustakin puusta oma kumulatiivinen tilavuuskäyrä suhteelliseen pituuteen nähden ja näiden pisteiden avulla laskettiin kullekin puulle oma kumulatiivinen tilavuuskäyrä. Puukohtaiset kumulatiiviset tilavuuskäyrät ja niiden R^2 -arvot on esitetty taulukossa (Taulukko 12).

Taulukko 12. Koepuiden puukohtaiset kumulatiiviset tilavuuskäyrämallit ja niiden R^2 -arvot.

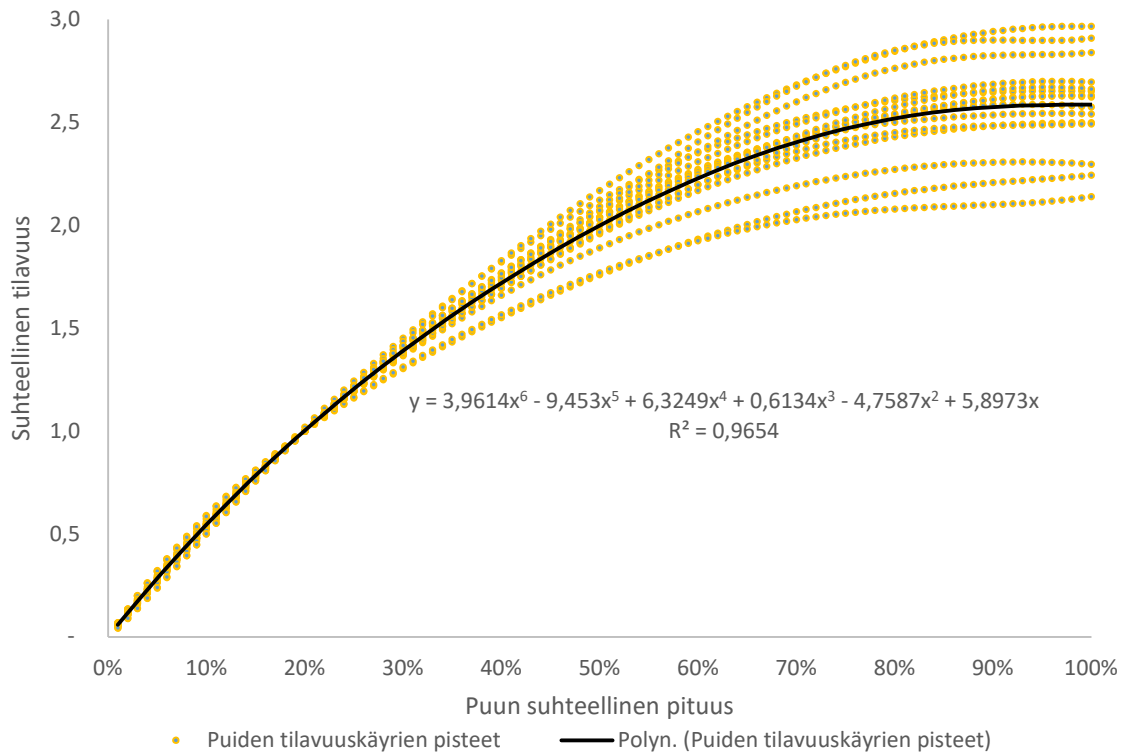
Koe-puu	Koko puun kumulatiivinen tilavuuskäyrä	R^2 -arvo
1	$y = -314,7x^6 + 1103,7x^5 - 1458,8x^4 + 894,52x^3 - 295,22x^2 + 108,99x$	$R^2 = 0,9992$
2	$y = 20,499x^5 + 6,5163x^4 - 69,351x^3 - 62,821x^2 + 202,48x$	$R^2 = 0,9993$
3	$y = -126,48x^2 + 245,05x$	$R^2 = 0,9996$
4	$y = 9,451x^5 - 28,095x^4 + 32,031x^3 - 20,066x^2 + 9,7216x$	$R^2 = 1$
5	$y = 22,86x^5 - 61,034x^4 + 62,65x^3 - 37,264x^2 + 18,321x$	$R^2 = 0,9993$
6	$y = -3,0455x^4 + 10,201x^3 - 21,064x^2 + 22,476x$	$R^2 = 0,9983$
7	$y = 0,029x^3 - 1,1147x^2 + 2,0038x$	$R^2 = 0,993$
8	$y = 39,808x^5 - 111,28x^4 + 120,55x^3 - 103,93x^2 + 92,924x$	$R^2 = 1$
9	$y = 146x^5 - 384,49x^4 + 363,76x^3 - 205,53x^2 + 130,88x$	$R^2 = 0,9998$
10	$y = -1,6838x^5 - 25,604x^4 + 61,641x^3 - 77,428x^2 + 76,019x$	$R^2 = 0,9999$
11	$y = 40,808x^3 - 379,7x^2 + 632,86x$	$R^2 = 0,9995$
12	$y = -54,282x^3 - 136,56x^2 + 426,39x$	$R^2 = 0,9993$
13	$y = 3911,9x^6 - 11636x^5 + 12719x^4 - 6255,4x^3 + 1143,3x^2 + 367,94x$	$R^2 = 0,9998$
14	$y = -113,53x^4 + 240,05x^3 - 316,24x^2 + 343,8x$	$R^2 = 0,9999$
15	$y = 2730x^6 - 8289,9x^5 + 9320,5x^4 - 4756,6x^3 + 873,1x^2 + 345,76x$	$R^2 = 0,9999$

Tämän jälkeen tilavuudet suhteutettiin siten, että tilavuuden arvoksi 20 % korkeudella asetettiin 1. Suhteellisten tilavuustietojen avulla laskettiin 1 500 datapistettä, josta voitiin laskea yhteinen kumulatiivinen tilavuuskäyrä. Käyrä on kuudennen asteen polynomi, joka pakotettiin saamaan arvo 0, kun suhteellinen pituus oli 0 %. Tuloksena saatiin suhteellisen tilavuuden kumulatiivinen kaava (Kaava 9). Kuvaaja ja datapisteet on esitetty kuvassa (Kuva 25).

$$PV(x) = y = 3,9614x^6 - 9,453x^5 - 6,3249x^4 + 0,6134x^3 - 4,7587x^2 + 5,8973x, \quad (9)$$

jossa

x = suhteellinen korkeus tyvestä.



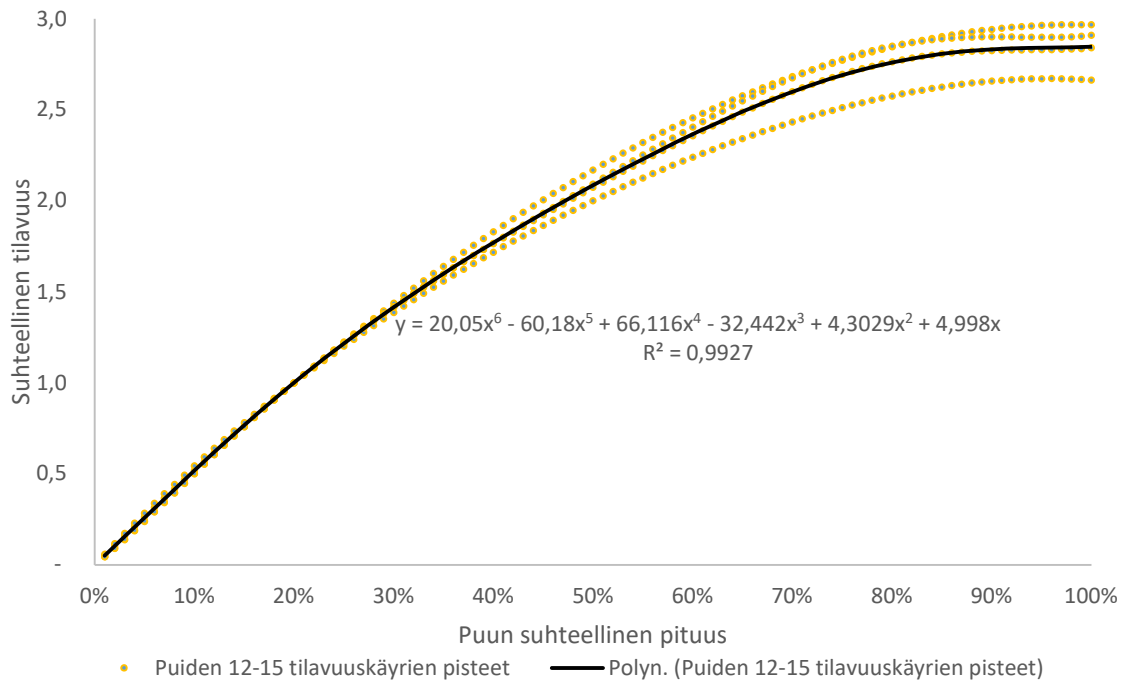
Kuva 25. Koepuiden kumulatiivinen tilavuuskäyrä. Mustalla yhtenäisellä viivalla on esitetty laskettu kumulatiivinen tilavuuskäyrä. Laskennassa käytetyt datapisteet on esitetty oransseilla pisteillä. Kuvassa myös yhtälön kaava ja sen R^2 -arvo.

Vastaava kumulatiivinen tilavuuskäyrä laskettiin myös koepuille 12–15. Suhteellisten tilavuustietojen avulla laskettiin 400 datapistettä, josta voitiin laskea yhteinen kumulatiivinen tilavuuskäyrä. Käyrä kuudennen asteen polynomi, joka pakotettiin saamaan arvo 0, kun suhteellinen pituus oli 0 %. Tuloksena saatiin suhteellisen tilavuuden kumulatiivinen kaava (Kaava 10). Kaava ja datapisteet on esitetty kuvassa (Kuva 26).

$$PV_{1215}(x) = y = 20,05x^6 - 60,18x^5 + 66,116x^4 - 32,442x^3 + 4,3029x^2 + 4,998x, \quad (10)$$

jossa

x = suhteellinen korkeus tyvestä.



Kuva 26. Koepuiden 12–15 kumulatiivinen tilavuuskäyrä. Mustalla yhtenäisellä viivalla on esitetty kumulatiivinen tilavuuskäyrä. Laskennassa käytetyt datapisteet on esitetty oransseilla pisteillä. Kuvassa myös yhtälön kaava ja sen R^2 -arvo.

Koko puun tilavuus lasketaan samalla periaatteella kuin luvussa 3.10. on esitetty. Käytettävät kertoimet ovat samoja kuin rungon tilavuutta laskettaessa, koska 20 % korkeudella ei ole vielä latvusta.

3.8. Koko puun suhteellinen tilavuus

Koko puun suhteellisen tilavuuden laskemiseksi on näin ollen neljä vaihtoehtoa:

1. Kaikkien puiden rungon suhteellisen tilavuuden kaava (6) + Oksien suhteellisen tilavuuden kaava (8) * Kaikkien puiden rungon suhteellisen tilavuuden kaava (6) * Oksien tilavuuden suhde rungon tilavuuteen =

$$SV1(x) = RV(x) + OV\left(\frac{5}{3}x - \frac{2}{3}\right) * RV(x) * a \quad (11)$$

2. Puiden 12-15 rungon suhteellisen tilavuuden kaava (7) + Oksien suhteellisen tilavuuden kaava (8) * Puiden 12-15 rungon suhteellisen tilavuuden kaava (7) * Oksien tilavuuden suhde rungon tilavuuteen =

$$SV2(x) = RV1215(x) + OV\left(\frac{5}{3}x - \frac{2}{3}\right) * RV1215(x) * a \quad (12)$$

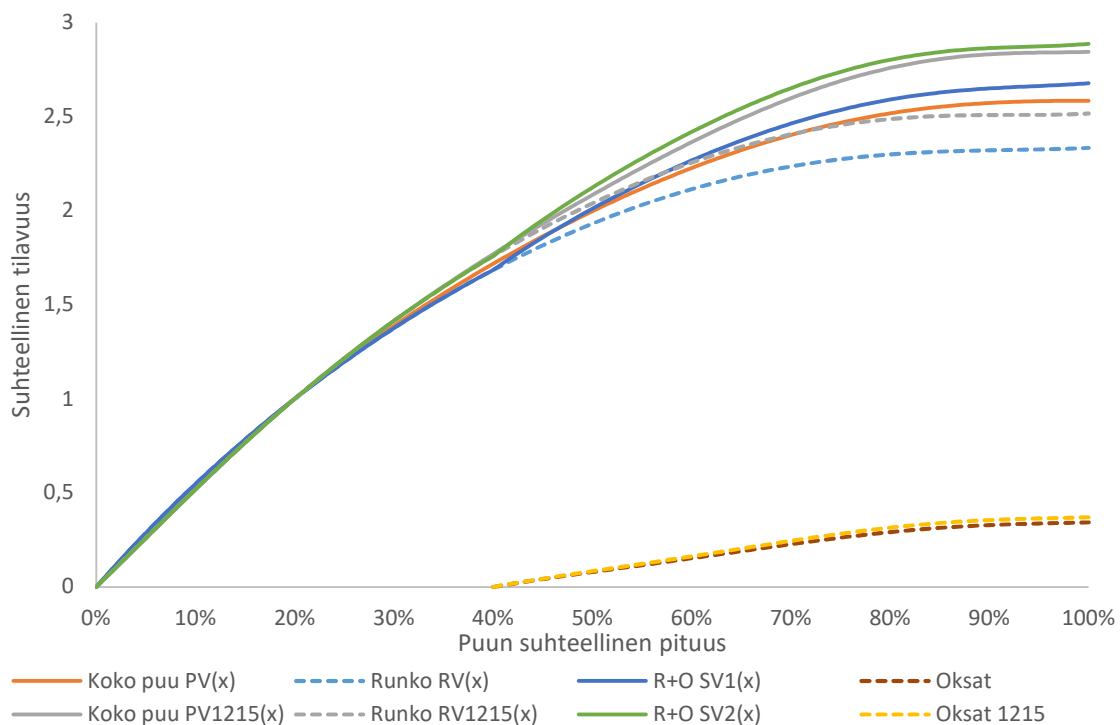
3. Kaikkien puiden koko puun suhteellisen tilavuuden kaava (9) =

$$SV3(x) = PV(x) \quad (13)$$

4. Puiden 12-15 koko puun suhteellisen tilavuuden kaava (10) =

$$SV4(x) = PV1215(x) \quad (14)$$

Koko puun suhteellisen tilavuuden laskuvaihtoehdot suhteellisen pituuden suhteen esitetään kuvassa (Kuva 27).



Kuva 27. Koko puun suhteellisen tilavuuden laskuvaihtoehdot suhteellisen pituuden suhteen.

3.9. Tilavuus 20 % korkeudella

Sekä rungon että koko puun tilavuusmallit tarvitsevat tilavuuden laskemiseksi puun (=runkon) tilavuuden 20 % korkeudelta. Tämä vastaa luvussa 3.4. tehtävää runkokäyrän laskemista eli rungon ja koko puun tilavuusmallien pohjalta voidaan laskea puun kumulatiivisen tilavuuden käyrä, jos tiedetään puun pituus ja puun tilavuus jollain suhteellisella korkeudella. Tämä tapahtuu ratkaisemalla $V_{.2h}$:n estimaatti sijoittamalla kaavaan 7 V_1 :n paikalle mitattu tilavuus ja 1:n paikalle läpimitan mittauskorkeus. Sitten merkitsemällä kaava 7 $g(x)$:ksi ja $V_{.2h}$:n estimaatti $Ve_{.2h}$:ksi saadaan tilavuuskäyrälle yhtälö:

$$V_l = V_{e.2h} * g(x) \quad (15)$$

Toisin kuin runkokäyrän tapauksessa tilavuutta jollain korkeudella V_l ei ole käytännöllistä tai helppoa mitata ja sitä kautta saada $V_{e.2h}$:lle estimaattia. Tämä takia se lasketaan tässä työssä kahdella vaihtoehtoisella tavalla:

- 1) runkokäyrän pyörähdyskappaleen pohjalta tai
- 2) koepuiden omien tilavuuskäyrien pohjalta laskettu $V_{20\%}$ -käyrä

Runkokäyrän pyörähdystilavuus lasketaan seuraavalla kaavalla

$$V = \frac{\pi}{4} * d_{20\%}^2 * h * \int_{\frac{h-l_2}{h}}^{\frac{h-l_1}{h}} (f(x))^2 dx, \quad (16)$$

jossa

V = pyörähdyskappaleen tilavuus

$d_{20\%}$ = läpimitta 20 %:n korkeudella

h = puun pituus

l_1 = lopetuskohdan etäisyys latvasta

l_2 = aloituskohdan etäisyys latvasta

$h-l_2/h$ = suhteellinen aloituskohta

$h-l_1/h$ = suhteellinen lopetuskohta

$f(x)$ = kaava 1 taulukon kertoimilla

Kaavan 16 avulla voidaan laskea tilavuus 20 % korkeudella, jolloin kaava saa muodon:

$$VP_{20\%} = \frac{\pi}{4} * d_{20\%}^2 * h * \int_0^{20\%} (f(x))^2 dx, \quad (17)$$

jossa

$VP_{20\%}$ = pyörähdyskappaleen tilavuus 20 % korkeudella

$d_{20\%}$ = läpimitta 20 %:n korkeudella

h = puun pituus

$f(x)$ = kaava 1 taulukon kertoimilla

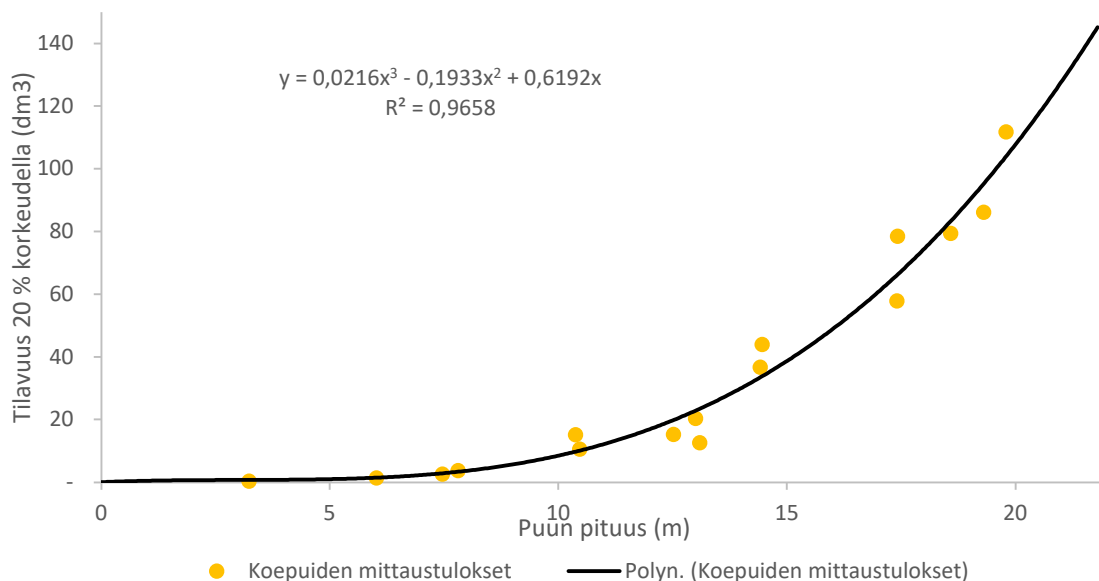
Koepuiden omien tilavuuskäyrien pohjalta laskettiin $V_{20\%}$ -käyrä luomalla mahdollisimman sopiva käyrä kunkin puun omilla tilavuuskäyrillä saaduilla luvuilla puun pituuteen nähden (Kuva 28). Sopivan kaavan löytämisessä hyödynnettiin Microsoft Excelin Trendiviiva-toimintoa. Sopivin polynomi valittiin R^2 -arvon sekä käyrän muodon perusteella kuten edellä. Puun tilavuus 20 % korkeudella ($V_{20\%}$) käyräksi saatiin:

$$V_{20\%} = 0,0216x^3 - 0,1933x^2 + 0,6192x, \quad (18)$$

jossa

$V_{20\%}$ = puun tilavuus 20 % korkeudella

x = puun pituus



Kuva 28. Koepuiden tilavuuden 20 % korkeudella puun pituuden suhteen. Mustalla yhtenäisellä viivalla on esitetty tilavuuskäyrä 20 % suhteellisella korkeudella. Laskennassa käytetyt datapisteet on esitetty oransseilla pisteillä. Kuvassa myös yhtälön kaava ja sen R^2 -arvo.

Saatuja kahta mallia verrattiin mittaamalla saatuihin tilavuuksiin. Koepuiden 1–11 osalta mitatut tilavuudet laskettu matemaattisesti ja koepuiden 12–15 osalta käytettiin upotusmittauksissa saatuja tilavuuksia. Tilavuudet ja niiden erot esitetty taulukossa (Taulukko 13).

Taulukko 13. Koepuiden mitattuja ja laskettuja tilavuuksia 20 % korkeudella sekä laskennassa käytettyjä suureita. Erojen keskiarvot on laskettu ero itseisarvoilla.

Koe- puun nu- mero	Läpimitta 20 % korkeudella (cm)	Puun pituus (m)	Mitattu tilavuus (dm ³)	Kaavan tilavuus (dm ³)	Pyörähdys- tilavuus (dm ³)	Mitatun ja kaavan ero (%)	Mitatun ja pyörähdysti- lavuuden ero (%)
1	8,54	10,38	15,14	9,76	15,77	35,6 %	-4,1 %
2	11,75	14,42	36,70	33,48	41,51	8,8 %	-13,1 %
3	12,97	14,46	43,95	33,84	50,67	23,0 %	-15,3 %
4	3,07	6,02	1,36	1,43	1,18	-5,7 %	12,8 %
5	3,76	7,47	2,58	2,84	2,20	-9,7 %	14,9 %
6	4,77	7,81	3,73	3,33	3,70	10,7 %	0,9 %
7	2,41	3,23	0,36	0,71	0,39	-99,6 %	-10,0 %
8	7,84	12,52	15,23	19,84	16,06	-30,3 %	-5,5 %
9	8,78	13,00	20,30	22,85	20,89	-12,6 %	-2,9 %
10	7,02	13,09	12,56	23,45	13,43	-86,7 %	-7,0 %
11	17,13	19,80	111,71	104,08	121,15	6,8 %	-8,5 %
12	14,76	18,58	79,38	83,37	84,39	-5,0 %	-6,3 %
13	15,71	19,31	86,15	95,35	99,37	-10,7 %	-15,3 %
14	12,92	17,40	57,85	66,09	60,52	-14,3 %	-4,6 %
15	15,58	17,42	78,46	66,27	88,16	15,5 %	-12,4 %
Keskiarvo						25,0 %	8,9 %

3.10. Koko puun tilavuuden laskeminen

Puun tilavuus lasketaan kertomalla puun suhteellinen tilavuus puun tilavuudella 20 % korkeudella.

Puun suhteelliselle tilavuudelle on neljä vaihtoehtoa, jotka on esitetty luvussa 3.8. ja puun tilavuudella 20 % korkeudella on kaksi vaihtoehtoa, jotka on esitetty luvussa 3.9.

Tilavuuden laskemiseen riittää pelkkä puun pituus, paitsi jos puun 20 % tilavuus laske-
taan kaavalla 17, niin pituuden lisäksi tarvittava $d_{20\%}$ saadaan runkokäyrän avulla (kaava
1, kertoimet taulukoista Taulukko 6 tai Taulukko 7) luvussa 3.4. kerrotulla tavalla.

Puun tilavuus lasketaan kertomalla puun suhteellisen tilavuuden kaava (Kaava 11, 12, 13
tai 14) tilavuus 20 % korkeudella kaavalla (Kaava 17 tai 18). Näin saadaan kahdeksan eri

vaihtoehtoa laskea koko puun tilavuus suhteellisella korkeudella x (0–100 %). Neljä ensimmäistä vaihtoehtoa ($V_{p1} - V_{p4}$) tarvitsevat lähtötiedoksi vain puun pituuden ja neljä jälkimmäistä ($V_{p5} - V_{p8}$) puun pituuden ja läpimitan 20 % korkeudella. Läpimitta 20 % korkeudella voidaan laskea runkokäyrän avulla, kunhan tiedetään puun pituus ja läpimitta jollain korkeudella.

$$V_{p1} = SV1(x) * V_{20\%} \quad (19)$$

$$V_{p2} = SV2(x) * V_{20\%} \quad (20)$$

$$V_{p3} = SV3(x) * V_{20\%} \quad (21)$$

$$V_{p4} = SV4(x) * V_{20\%} \quad (22)$$

$$V_{p5} = SV1(x) * VP_{20\%} \quad (23)$$

$$V_{p6} = SV2(x) * VP_{20\%} \quad (24)$$

$$V_{p7} = SV3(x) * VP_{20\%} \quad (25)$$

$$V_{p8} = SV4(x) * VP_{20\%} \quad (26)$$

Puun tilavuus voidaan myös laskea runkokäyrän pyörähdystilavuuden (kaava 16) ja oksien suhteellisen tilavuuden (kaava 8) avulla samaan tapaan kuin kaavassa 11, kunhan tiedetään puun pituus ja läpimitta jollain korkeudella. Tällöin rungon tilavuus suhteellisella korkeudella x on $VP_{x\%} = \frac{\pi}{4} * d_{20\%}^2 * h * \int_0^{x\%} (f(x))^2 dx$ ja oksien tilavuus suhteellisella korkeudella x on $OV\left(\frac{5}{3}x - \frac{2}{3}\right) * VP_{x\%}(x) * a$, kun $x > 40\%$, muuten oksien tilavuus on 0:

$$V_{p9} = VP_{x\%}(x) * (1 + OV\left(\frac{5}{3}x - \frac{2}{3}\right) * a) \quad (27)$$

Kaikkien koepuiden kokonaistilavuudet laskettiin yllä mainituilla kaavoilla sekä Hoppin (2018) ja Repolan (2008) kaavoilla (Taulukko 14).

$$\text{Hoppi: } V_{Hoppi} = 0,022914 * d^{1,953} * 1,006^d * h^{3,328} * (h - 1,3)^{-2,17} \quad (28)$$

$$\text{Repola: } \ln(y) = -3,654 + 10,582 * \frac{dS}{dS+12} + 3,018 * \frac{h}{h+22} + 0,00795, \quad (29)$$

joissa

$\ln(y)$ = Puun rungon kuivamassa kilogrammoina

d = Puun rinnankorkeusläpimitta

$$dS = 2 + 1,25 \cdot d$$

h = Puun pituus

Repolan malli antaa tuloksen kilogrammoina, joten se muutettiin tilavuudeksi käyttämällä koivun keskimääräistä harvennusenergiapuun kuivatuoretiheyttä 474 kg/m^3 (Ronkainen ym. 2014).

Taulukko 14. Yhdeksän itse lasketun mallin, kahden vertailumallin maanpäälliset sekä mittausdatan mukaiset tilavuudet. Itse lasketuissa malleissa tilavuus 1 %–100 % pituudelle, vertailumalleissa 0 %–100 % ja mittausdata kannonkorkeus - 100 %. Data oksien ja koepuiden 12–15 rungot saatu upotusmittauksilla ja koepuiden 1–11 matemaattisesti läpimitta ja pituusmittojen avulla.

Koe- puu	V_{p1}	V_{p2}	V_{p3}	V_{p4}	V_{p5}	V_{p6}	V_{p7}	V_{p8}	V_{p9}	Hoppi	Repola	Mit- taus- data
1	25,54	27,66	24,65	27,26	41,29	44,73	39,85	44,07	39,47	38,37	40,92	38,48
2	87,66	94,96	84,61	93,57	108,67	117,71	104,88	115,99	103,88	94,99	101,79	97,30
3	88,60	95,97	85,51	94,57	132,65	143,69	128,03	141,59	126,80	116,10	127,00	118,95
4	3,75	4,06	3,62	4,01	3,10	3,35	2,99	3,30	2,96	3,06	3,57	3,04
5	7,42	8,04	7,17	7,93	5,76	6,24	5,56	6,15	5,51	5,44	5,81	5,53
6	8,72	9,44	8,41	9,31	9,67	10,48	9,34	10,33	9,25	8,74	9,01	8,58
7	1,86	2,02	1,80	1,99	1,03	1,11	0,99	1,10	0,98	0,92	1,33	0,92
8	51,95	56,28	50,14	55,46	42,04	45,54	40,57	44,87	40,19	36,24	36,24	38,05
9	59,83	64,81	57,75	63,87	54,70	59,25	52,79	58,39	52,29	54,31	56,28	50,62
10	61,40	66,51	59,26	65,54	35,16	38,09	33,94	37,53	33,61	33,38	32,65	32,95
11	272,48	295,17	262,99	290,86	317,17	343,58	306,13	338,56	303,19	298,32	315,82	290,73
12	218,25	236,42	210,65	232,97	220,94	239,33	213,25	235,84	211,20	202,94	213,92	234,36
13	249,63	270,42	240,94	266,47	260,14	281,80	251,08	277,68	248,68	229,59	241,14	251,41
14	173,03	187,44	167,01	184,70	158,43	171,62	152,92	169,12	151,45	143,60	150,78	153,71
15	173,49	187,94	167,45	185,19	230,81	250,02	222,77	246,37	220,63	200,83	217,19	222,78

Prosentuaaliset ja dm^3 -määräiset erot lasketun tilavuuden ja eri kaavojen tilavuuksien on esitetty taulukoissa (Taulukko 15 ja Taulukko 16). Positiivinen lukema tarkoittaa, että kaava antaa suuremman tilavuuden kuin mittausdata ja negatiivinen lukema tarkoittaa päinvastaista.

Taulukko 15. Yhdeksän itse lasketun mallin ja kahden vertailumallin maanpäällisten tilavuuksien prosentuaalinen ero verrattuna mitattuun tilavuuteen. Koepuut järjestetty lyhimmästä pisimpään.

	± 2 %	± 5 %	± 10 %	± 20 %	> ± 20 %						
Koe- puu	V _{p1}	V _{p2}	V _{p3}	V _{p4}	V _{p5}	V _{p6}	V _{p7}	V _{p8}	V _{p9}	Hoppi	Repola
7	50,8 %	54,6 %	49,0 %	53,9 %	10,7 %	17,5 %	7,4 %	16,3 %	-7,0 %	0,1 %	-44,7 %
4	18,9 %	25,2 %	16,0 %	24,0 %	1,7 %	9,3 %	-1,8 %	7,9 %	2,7 %	0,5 %	-17,4 %
5	25,5 %	31,2 %	22,8 %	30,2 %	4,0 %	11,3 %	0,5 %	10,0 %	0,5 %	-1,7 %	-5,1 %
6	1,6 %	9,1 %	-2,0 %	7,8 %	11,3 %	18,1 %	8,1 %	16,9 %	-7,8 %	1,8 %	-5,0 %
1	-50,7 %	-39,1 %	-56,1 %	-41,1 %	6,8 %	14,0 %	3,5 %	12,7 %	-2,6 %	-0,3 %	-6,3 %
8	26,8 %	32,4 %	24,1 %	31,4 %	9,5 %	16,4 %	6,2 %	15,2 %	-5,6 %	-5,0 %	4,8 %
9	15,4 %	21,9 %	12,3 %	20,7 %	7,4 %	14,6 %	4,1 %	13,3 %	-3,3 %	6,8 %	-11,2 %
10	46,3 %	50,5 %	44,4 %	49,7 %	6,3 %	13,5 %	2,9 %	12,2 %	-2,0 %	1,3 %	0,9 %
2	-11,0 %	-2,5 %	-15,0 %	-4,0 %	10,5 %	17,3 %	7,2 %	16,1 %	-6,8 %	-2,4 %	-4,6 %
3	-34,3 %	-23,9 %	-39,1 %	-25,8 %	10,3 %	17,2 %	7,1 %	16,0 %	-6,6 %	-2,5 %	-6,8 %
15	-28,4 %	-18,5 %	-33,0 %	-20,3 %	3,5 %	10,9 %	0,0 %	9,6 %	1,0 %	-10,9 %	2,5 %
14	11,2 %	18,0 %	8,0 %	16,8 %	3,0 %	10,4 %	-0,5 %	9,1 %	1,5 %	-7,0 %	1,9 %
12	-7,4 %	0,9 %	-11,3 %	-0,6 %	-6,1 %	2,1 %	-9,9 %	0,6 %	9,9 %	-15,5 %	8,7 %
13	-0,7 %	7,0 %	-4,3 %	5,7 %	3,4 %	10,8 %	-0,1 %	9,5 %	1,1 %	-9,5 %	4,1 %
11	-6,7 %	1,5 %	-10,5 %	0,0 %	8,3 %	15,4 %	5,0 %	14,1 %	-4,3 %	2,5 %	-8,6 %

Taulukko 16. Yhdeksän itse lasketun mallin ja kahden vertailumallin maanpäällisten tilavuuksien ero verrattuna mitattuun tilavuuteen (dm³). Koepuut järjestetty lyhimmästä pisimpään.

	± 2 dm³	± 5 dm³	± 10 dm³	± 20 dm³	> ± 20 dm³							
Koe- puu	V _{p1}	V _{p2}	V _{p3}	V _{p4}	V _{p5}	V _{p6}	V _{p7}	V _{p8}	V _{p9}	Hoppi	Repola	
7	0,95	1,10	0,88	1,07	0,11	0,19	0,07	0,18	0,06	0,00	0,41	
4	0,71	1,02	0,58	0,96	0,05	0,31	- 0,05	0,26	- 0,08	0,02	0,53	
5	1,89	2,51	1,63	2,39	0,23	0,71	0,03	0,62	- 0,03	- 0,09	0,28	
6	0,14	0,86	- 0,17	0,72	1,09	1,90	0,76	1,75	0,67	0,16	0,43	
1	-12,94	-10,81	-13,83	-11,21	2,81	6,25	1,38	5,60	0,99	- 0,11	2,44	
8	13,90	18,22	12,09	17,40	3,98	7,48	2,52	6,82	2,13	- 1,81	- 1,81	
9	9,21	14,19	7,12	13,24	4,07	8,63	2,17	7,76	1,66	3,68	5,65	
10	28,45	33,56	26,31	32,59	2,21	5,14	0,99	4,58	0,66	0,43	- 0,30	
2	- 9,64	- 2,34	-12,69	- 3,73	11,36	20,41	7,58	18,69	6,57	- 2,31	4,49	
3	-30,36	-22,98	-33,44	-24,38	13,69	24,73	9,07	22,64	7,85	- 2,85	8,05	
15	-49,29	-34,84	-55,33	-37,59	8,02	27,24	- 0,01	23,59	- 2,15	-21,96	- 5,59	
14	19,32	33,73	13,29	30,99	4,72	17,91	- 0,80	15,40	- 2,26	-10,12	- 2,93	
12	-16,11	2,06	-23,71	- 1,39	-13,42	4,97	-21,12	1,47	-23,16	-31,42	- 20,45	
13	- 1,78	19,01	-10,47	15,06	8,73	30,39	- 0,33	26,27	- 2,73	-21,82	- 10,27	
11	-18,24	4,44	-27,73	0,13	26,45	52,85	15,40	47,83	12,47	7,60	25,09	

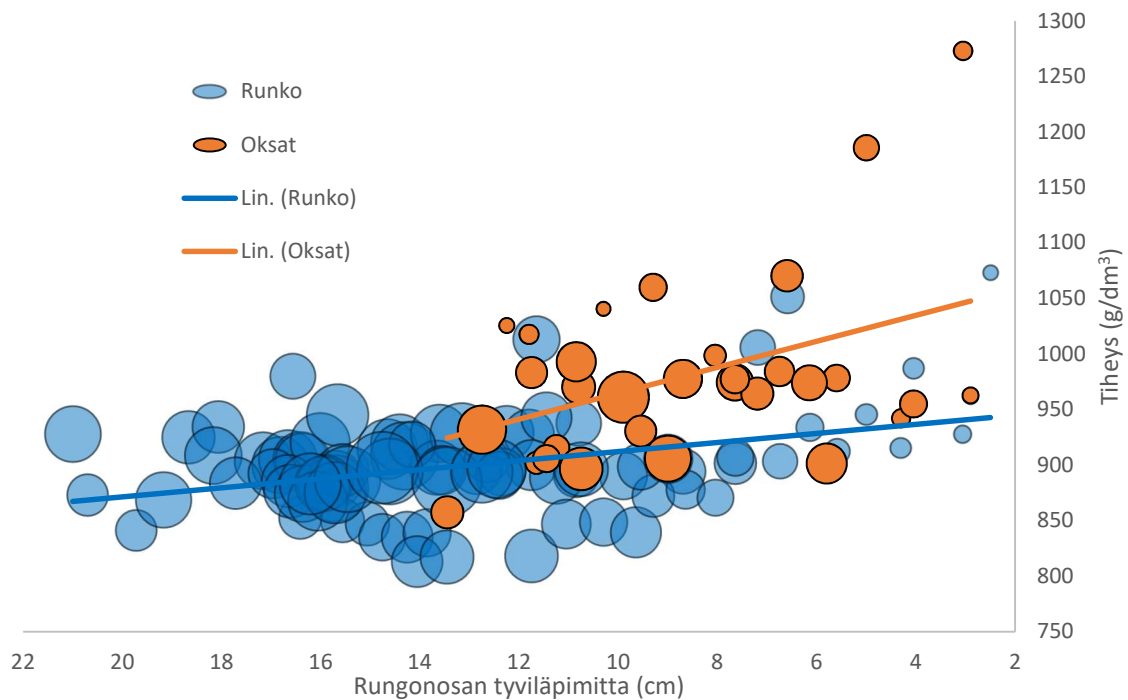
3.11. Tiheyden laskeminen

Koepuiden 12–15 rungon osien tiheydet vaihtelivat 776 g/dm^3 ja $1\,074 \text{ g/dm}^3$ välillä, jossa koepuun 12 tiheydet olivat selkeästi muita pienempiä. Oksien osalta tiheydet vaihtelivat 779 g/dm^3 ja $1\,273 \text{ g/dm}^3$ välillä, jossa koepuun 12 tiheydet olivat selkeästi muita pienempiä. Koepuun 12 upotusmittauksissa oli muitakin epäjohdonmukaisuuksia, joten koepuun 12 tulokset jätettiin huomioimatta. Tiheyksien laskennassa käytettiin upotusmittauksissa saatuja tilavuuksia ja vaa’alla punnittuja massoja. Koepuiden tiheyksien arvoja esitetty taulukossa (Taulukko 17). Rungon keskimääräinen rungonosan massalla painotettu tiheys oli 895 g/dm^3 ja oksien vastaava 963 g/dm^3 .

Taulukko 17. Koepuiden rungon ja oksien tiheyksien arvoja.

Koe- puu	Runko / Oksat	Keski- arvo (g)	Keskiha- jonta (g)	Minimi (g)	Maksimi (g)
12	Runko	849,8	41,6	776,0	937,4
12	Oksat	870,1	89,0	779,2	1096,4
13	Runko	918,0	31,0	879,1	1051,0
13	Oksat	1013,9	88,3	942,2	1273,0
14	Runko	880,2	60,1	813,3	1073,5
14	Oksat	976,5	60,0	901,4	1060,1
15	Runko	900,3	32,2	867,6	1012,7
15	Oksat	951,2	83,4	857,4	1185,8

Oksien tiheydet olivat suurempia kuin rungonosien ja molempien tiheydet kasvoivat rungonosan tyviläpimitan pienentyessä eli latvaa kohti mentäessä. Kuvassa on esitetty rungonosien ja oksien tiheydet rungonosan tyviläpimitan suhteen sekä niistä saadut regressiokäyrät (Kuva 29). Ympyrän koko kuvaa osan punnittua massaa.



Kuva 29. Koepuiden 13–15 rungonosien ja oksien tiheydet rungonosan tyviläpimitan suhteen. Ympyrän koko kuvaa osan massaa. Oranssilla yhtenäisellä viivalla on esitetty oksien regressiokäyrä. Sinisellä yhtenäisellä viivalla on esitetty rungon regressiokäyrä.

3.12. Biomassamallit

Suhteellisista tilavuusmalleista (kaavat 11–14) saadaan vastaavat biomassamallit, kun ne kerrotaan tiheydellä ja ne edelleen kerrotaan 20 % tilavuudella kuten edellä luvussa 3.10. Tiheyksinä voidaan käyttää rungon osalta rungon keskimääräistä tiheyttä 895 g/dm^3 (ρ_r) (kaavat 11, 12 ja 27) ja oksien osalta oksien keskimääräistä tiheyttä 963 g/dm^3 (ρ_o) (kaavat 11, 12 ja 27) ja koko puun osalta näiden painotettua keskiarvoa 905 g/dm^3 (ρ_k) (kaavat 13 ja 14). Näin tulokseksi saadaan puun biomassa.

Toinen vaihtoehto on käyttää tiheyden paikalla kuivatuoretiheyttä, jolloin tulokseksi saadaan puun kuivabiomassa.

4. TULOSTEN TARKASTELU

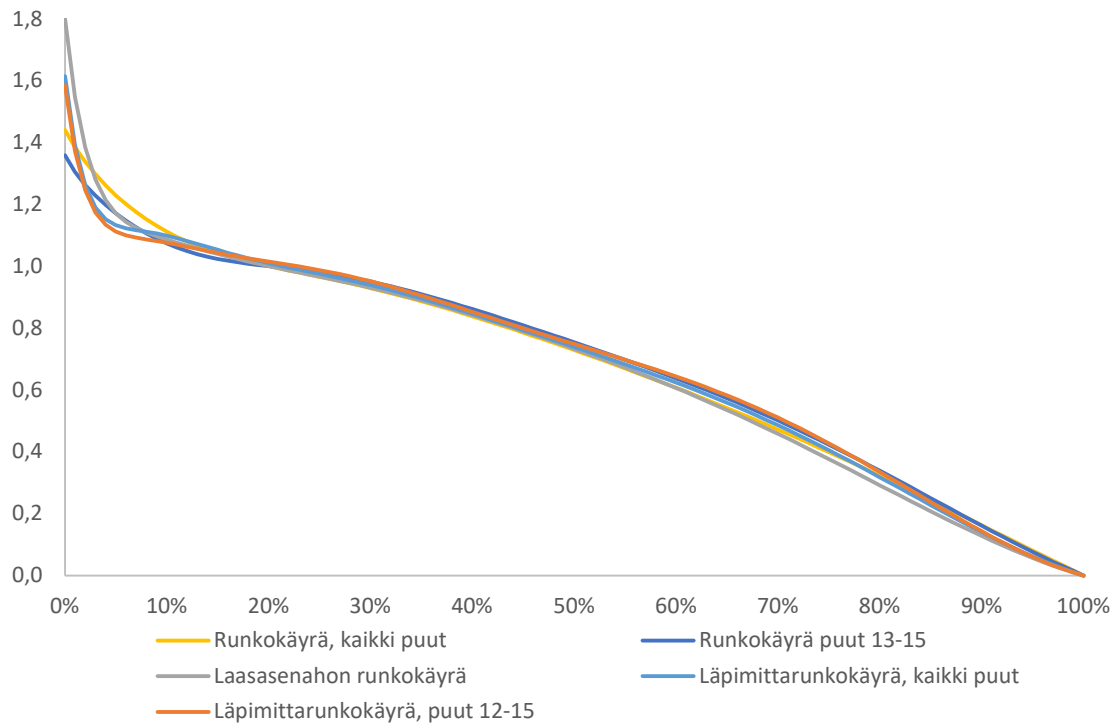
4.1. Runkokäyrät

Jokaiselle puulle tehtiin oma runkokäyrämalli perustuen läpimittadataan. Runkokäyrämallit olivat 3–6 asteen polynomeja ja niiden selitysasteet vaihtelivat 0,9775 ja 0,999 välillä. Sopivin 3–6 asteen polynomi valittiin selitysasteen ja yleisen sopivuuden perusteella. Yleistä sopivuutta arvioitiin käyrän muodon realistisuuden näkökulmasta eli käyrän piti olla laskeva (puun runko ohenee latvaa kohti mentäessä). Osassa koepuista ylemmän asteen polynomit alkoivat kärsiä Rungen ilmiöstä ja ne oli hylättävä.

Jokaisen puun runkokäyrämalli suhteutettiin siten, että 20 % korkeudella läpimitaksi saatiin kaikille 1 ja suhteutetuista runkokäyristä laskettiin yhteinen runkokäyrä. Yhteisessä runkokäyrässä käytettiin Fibonaccin lukusarjan pohjautuvia polynomin astekertoimia. Tämän lisäksi samalla tyylillä laskettiin runkokäyrä, jossa käytettiin vain kolmea koepuuta, koepuuta 13–15. Koepuu 12 jätettiin pois kaksiahaaraisuuden takia. RMSE koepuiden yhteisellä kaavalla on 2,657 ja samalla aineistolla Laasasenahon runkokäyrällä laskettuna RMSE on 5,851 ja 13–15 runkokäyrällä 3,664 ja vastaavasti selitysasteet 0,987, 0,981 ja 0,972.

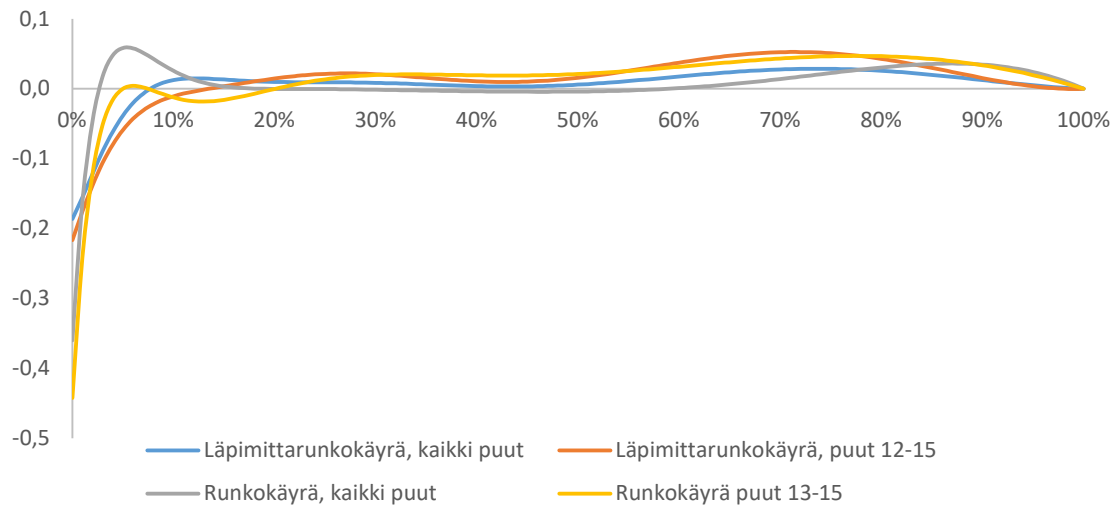
Edellä mainittujen runkokäyrien lisäksi laskettiin runkokäyrät kaikille puilla sekä koepuille 12–15 toisella tavalla, läpimittamittauksia hyödyntäen. Luvussa 3.1. saaduista runkokäyristä laskettiin kunkin puun laskennallinen läpimitta 20 % korkeudella ja jaettiin mittaustulokset sillä. Saaduista datapisteistä laskettiin runkokäyrät Fibonaccin lukusarjaa hyödyntäen.

Runkokäyrät on esitetty kuvassa (Kuva 30).



Kuva 30. Laasasenahon, kaikkien puiden ja puiden 13–15 runkokäyrät laskettuna yksittäisten puiden runkokäyrien avulla sekä kaikkien puiden ja puiden 12–15 runkokäyrät laskettuna läpimittamittausten avulla.

Neljällä eri tavalla laskettujen runkokäyrien erot verrattuna Laasasenahon runkokäyrään (lasketut runkokäyrät miinus Laasasenahon runkokäyrä) on esitetty kuvassa (Kuva 331). Runkokäyrien muoto eroaa eniten tyveltä, jossa yksittäisten puiden runkokäyrien avulla laskettujen runkokäyrien muotoa loiventavat kaikkien puiden yhtä suuri painoarvo yhteisessä käyrässä, vaikka pienemmillä puilla on selkeästi vähäisempi määrä läpimittaustietoa verrattuna isompiin puihin. Muuten runkokäyrät ovat hyvin samanmuotoisia keskiosassa, noin 15–60 %, varsinkin kaikkien puiden avulla laskettu runkokäyrä. Lasketut runkokäyrät ovat hieman paksumpia Laasasenahon runkokäyrään verrattuna. Pienimmät erot Laasasenahon runkokäyrään koko rungon osalta antaa kaikkien puiden läpimittojen avulla laskettu runkokäyrä.



Kuva 31. Kaikkien puiden runkokäyrän, puiden 13–15 runkokäyrän sekä kaikkien puiden läpimittarunkokäyrän, puiden 12–15 läpimittarunkokäyrän erotus verrattuna Laasasenahon runkokäyrään.

4.2. Rungon kumulatiivinen suhteellinen tilavuuskäyrä

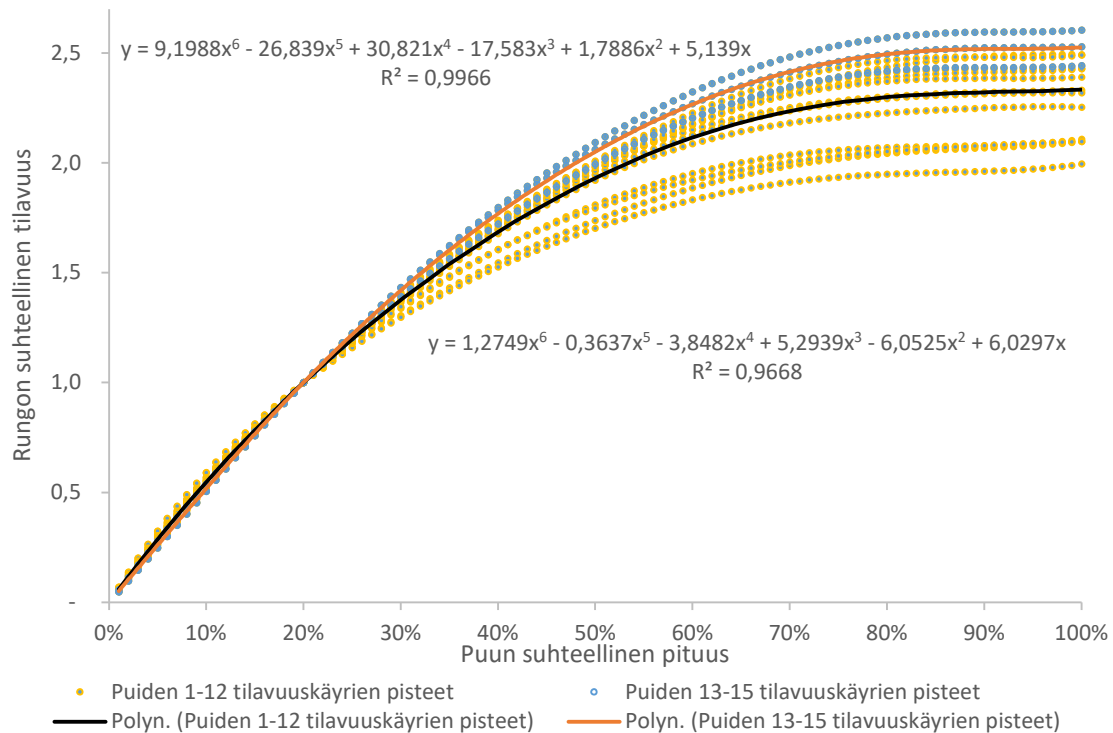
Rungon tilavuuden osalta toimittiin samoin kuin runkokäyrissä ja jokaiselle puulle muodostettiin kumulatiivinen tilavuuskäyrä perustuen upotusmittausdataan (koepuut (13–15) tai läpimittojen perusteella katkaistun kartion tai Simpsonin kaavalla laskettuihin (koepuut 1–11) tilavuuksiin.

Kumulatiiviset tilavuuskäyrät olivat 3–6 asteen polynomeja ja niiden selitysasteet vaihtelivat 0,9995 ja 1 välillä. Sopivin 3–6 asteen polynomi valittiin selitysasteen ja yleisen sopivuuden perusteella. Yleistä sopivuutta arvioitiin käyrän muodon realistisuuden näkökulmasta eli käyrän piti olla nouseva (kumulatiivinen tilavuus kasvaa latvaa kohti mentäessä). Osassa koepuista ylemmän asteen polynomit alkoivat kärsiä Rungen ilmiöstä ja ne oli hylättävä. Selitysasteet olivat erittäin korkeita ja selkeästi runkokäyriä korkeampia. Tämä selittyi kumulatiivisuuden tuomalla säännönmukaisuudella.

Jokaisen puun kumulatiivinen tilavuuskäyrä suhteutettiin siten, että 20 % korkeudella tilavuudeksi saatiin kaikille 1 ja suhteutetuista käyristä laskettiin yhteinen kumulatiivinen tilavuuskäyrä.

Tämän lisäksi samalla tyylillä laskettiin kumulatiivinen tilavuuskäyrä, jossa käytettiin vain kolmea koepuuta, koepuut 13–15. Yhteisen tilavuuskäyrän selitysaste oli 0,9668

(kaikkien puiden aineisto) ja koepuiden 13–15 tilavuuskäyrän 0,9966 (puiden 13–15 aineisto). Tilavuuskäyrät ja niiden laskentapistet on esitetty kuvassa (Kuva 32).



Kuva 32. Kaikkien koepuiden yhteinen ja koepuiden 13–15 kumulatiiviset rungon tilavuuskäyrät. Mustalla yhtenäisellä viivalla on esitetty laskettu yhteinen kumulatiivinen tilavuuskäyrä ja oranssilla yhtenäisellä viivalla on esitetty laskettu koepuiden 13–15 kumulatiivinen tilavuuskäyrä. Laskennassa käytetyt datapisteet on esitetty sinisillä ja keltaisilla pisteillä (yhteinen) ja sinisillä pisteillä (koepuut 13–15). Kuvassa myös yhtälöjen kaavat ja niiden R^2 -arvot.

Kumulatiivisista tilavuuskäyristä tulee runkokäyriä selvemmin esiin puiden erilainen muoto, keskimäärin pienemmillä puilla puun suhteellinen tilavuus on suurempi 20 % korkeudella kuin suuremmissa puissa ja tämä näkyy käyrän loppupäässä, jossa pienemmillä puilla loppuarvo on hieman yli kaksi, kun se keskimäärin on 2,33. Puiden 13–15 osalta loppuarvot nousivat vielä isommiksi ja ne olivat 2,44 ja 2,60 välillä.

4.3. Oksien suhteellinen tilavuuskäyrä

Oksien tilavuuden osalta toimittiin samoin kuin rungon tilavuuden osalta ja jokaiselle puulle muodostettiin kumulatiivinen tilavuuskäyrä perustuen upotusmittausdataan. Koepuiden 1–11 osalta käytettävät oksien tilavuudet ovat erittäin todennäköisesti aliarvioita, mutta niitä ei ole mitenkään korjattu laskelmissa.

Kumulatiiviset tilavuuskäyrät olivat 2–6 asteen polynomeja ja niiden selitysasteet vaihtelivat 0,9203 ja 1 välillä. Sopivin 2–6 asteen polynomi valittiin selitysasteen ja yleisen sopivuuden perusteella. Yleistä sopivuutta arvioitiin käyrän muodon realistisuuden näkökulmasta eli käyrän piti olla nouseva (kumulatiivinen tilavuus kasvaa latvaa kohti mentäessä). Osassa koepuista ylemmän asteen polynomit alkoivat kärsiä Rungen ilmiöstä ja ne oli hylättävä. Osaltaan tämä johtui mittauspisteiden vähyydestä (pienimmillään 2), joita jossain tapauksissa helpotettiin apupisteitä määrittelemällä. Selitysasteet ovat korkeita. Tämä selittyy kumulatiivisuuden tuomalla säännönmukaisuudella.

4.4. Koko puun kumulatiivinen suhteellinen tilavuuskäyrä

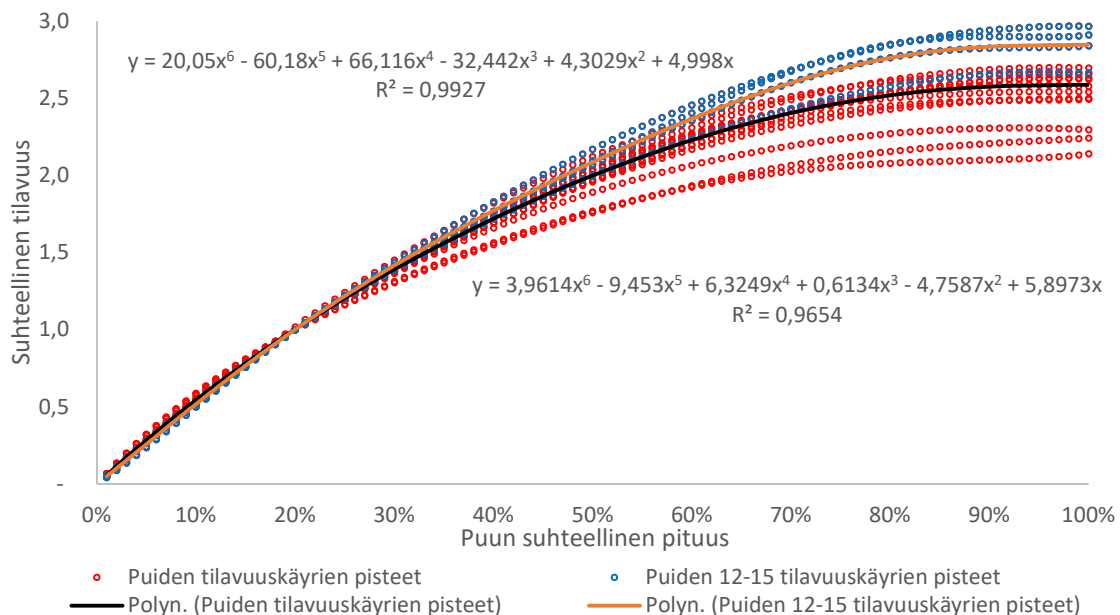
Koko puun tilavuuden osalta toimittiin samoin kuin rungon tilavuuskäyrissä sekä runkokäyrissä ja jokaiselle puulle muodostettiin koko puun kumulatiivinen tilavuuskäyrä perustuen upotusmittausdataan (koepuiden 12–15 rungot ja kaikkien koepuiden oksat) tai läpimittojen perusteella katkaistun kartion tai Simpsonin kaavalla laskettuihin (koepuiden 1–11 rungot) tilavuuksiin. Koepuiden 1–11 osalta käytettävät oksien tilavuudet ovat erittäin todennäköisesti aliarvioita, mutta niitä ei ole mitenkään korjattu laskelmissa.

Koko puun kumulatiiviset tilavuuskäyrät olivat 3–6 asteen polynomeja ja niiden selitysasteet vaihtelivat 0,993 ja 1 välillä. Sopivin 3–6 asteen polynomi valittiin selitysasteen ja yleisen sopivuuden perusteella. Yleistä sopivuutta arvioitiin käyrän muodon realistisuuden näkökulmasta eli käyrän piti olla nouseva (kumulatiivinen tilavuus kasvaa latvaa kohti mentäessä). Osassa koepuista ylemmän asteen polynomit alkoivat kärsiä Rungen ilmiöstä ja ne oli hylättävä. Selitysasteet olivat erittäin korkeita kuten rungon tilavuuksissa ja selkeästi runkokäyriä korkeampia. Tämä selittyy kumulatiivisuuden tuomalla säännönmukaisuudella.

Jokaisen puun koko puun kumulatiivinen tilavuuskäyrä suhteutettiin siten, että 20 % korkeudella tilavuudeksi saatiin kaikille 1 ja suhteutetuista käyristä laskettiin yhteinen koko puun kumulatiivinen tilavuuskäyrä.

Tämän lisäksi samalla tyylillä laskettiin koko puun kumulatiivinen tilavuuskäyrä, jossa käytettiin vain neljää koepuuta, koepuut 12–15. Yhteisen tilavuuskäyrän selitysaste oli 0,9654 (kaikkien puiden aineisto) ja koepuiden 12–15 tilavuuskäyrän 0,9927 (puiden 12–15 aineisto). Tilavuuskäyrät ja niiden laskentapisteet on esitetty kuvassa (Kuva 33).

Kumulatiivisista koko puun tilavuuskäyristä tulee runkokäyriä, kuten aiemmin rungon tilavuudessaakin, selvemmin esiin puiden erilainen muoto, keskimäärin pienemmillä puilla puun suhteellinen tilavuus on suurempi 20 % korkeudella kuin suuremmissa puissa ja tämä näkyy käyrän loppupäässä, jossa pienemmillä puilla loppuarvo on hieman yli kaksi, kun se keskimäärin on 2,61. Puiden 12–15 osalta loppuarvot nousivat vielä isommiksi ja ne olivat 2,66 ja 2,95 välillä. Osittain tähän vaikuttaa koepuiden 1–11 liian pienet oksatilavuudet.



Kuva 33. Kaikkien koepuiden yhteinen ja koepuiden 12–15 kumulatiiviset koko puun tilavuuskäyrät. Mus-talla yhtenäisellä viivalla on esitetty laskettu yhteinen kumulatiivinen tilavuuskäyrä ja oranssilla yhtenäisellä viivalla on esitetty laskettu koepuiden 12–15 kumulatiivinen tilavuuskäyrä. Laskennassa käytetyt data-pisteet on esitetty sinisillä ja punaisilla pisteillä (yhteinen) ja sinisillä pisteillä (koepuut 12–15). Kuvassa myös yhtälöjen kaavat ja niiden R^2 -arvot.

4.5. Tilavuus 20 % korkeudella

Tilavuus 20 % korkeudella laskettiin kahdella eri tavalla, runkokäyrän pyörähdyskappa-
leen avulla ja koepuiden omien tilavuuskäyrien pohjalta lasketulla käyrällä.

Koepuiden omien tilavuuskäyrien pohjalta laskettu käyrä on laskettu vain 15 pisteen
avulla ja se ei ota huomioon kuin puiden pituuden eli puiden eri muodot jäävät huomioi-
matta. Tämä aiheuttaa melko suuria heittoja tilavuuksiin melko samanpituisille, mutta eri
paksuisilla puilla.

Runkokäyrän avulla laskettu pyörähdystilavuus ottaa huomioon puun pituuden ja läpimi-
tan 20 % korkeudella ja se antaa selkeästi tarkemmat tulokset kuin edellä. Tämä on sel-
keästi nähtävissä aiemmin esitetyssä taulukossa (Taulukko 13).

4.6. Koko puun tilavuus

Eri kaavoissa saatuja tilavuuksia verrattiin mitattuihin tilavuuksiin luvussa edellä (3.10.).
Muissa kuin omissa kaavoissa saadut tilavuudet ovat koko maanpäällisen tilavuuden lu-
kuja, mutta mitatut tilavuudet eivät huomioi kannon tilavuutta. Omilla kumulatiivisilla
kaavoilla voidaan laskea minkä tahansa välin tilavuus ja vertailukohdaksi on tässä otettu
tilavuus välillä 1 %–100 %. Kannonkorkeutta ei ole mitenkään optimoitu mahdollisim-
man tarkan tuloksen saamiseksi.

Kaavat, joissa puun pituus oli ainoana selittävänä tekijänä, antoivat selkeästi vaihtelevampia tuloksia kuin muut. Tämä johtuu 20 % tilavuutta laskevan kaavan 18, jossa puun muotoa ei huomioida millään tavalla, epätarkkuudesta edellisessä luvussa esitetyistä syistä. Kaavat V_{p1} – V_{p4} antoivat lyhyimmille puille yleensä selvästi liian suuret tilavuudet ja pidemmille puille hieman liian suuret tilavuudet (Taulukko 14). Keskihajonnat prosentuaalisen virheen osalta olivat 25,4 % ja 28,5 % välillä ja 17,9 litran ja 20,3 litran välillä tilavuuden osalta. Pienimmän vaihtelun ja tarkimman tuloksen näistä kaavoista antoi kaava V_{p2} , jossa hyödynnettiin vain koepuiden 12–15 dataa ja tilavuus laskettiin rungon ja oksien suhteellisten kaavojen summalla.

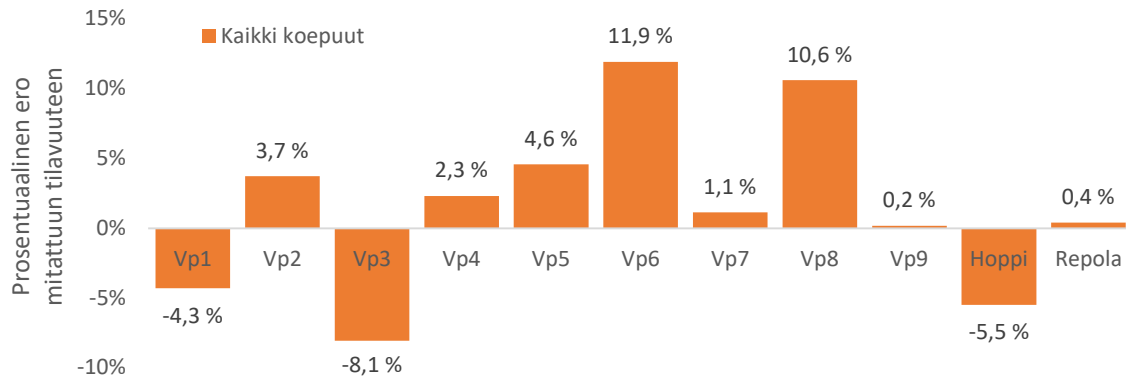
Kaavat V_{p5} – V_{p8} ottivat huomioon myös puun läpimitan jollain tietyllä korkeudella (tässä käytettyä 20 % korkeutta). Tämä otettiin huomioon laskemalla 20 % tilavuus runkokäyrän pyörähdystilavuudella. Nämä kaavat antoivat selkeästi tarkempia tuloksia, mutta niiden antamat tilavuudet olivat melkein kauttaaltaan liian isoja puun pituudesta huolimatta. Kaavat V_{p6} ja V_{p8} antoivat mitattua suuremman tilavuuden kaikkien puiden osalta ja V_{p5} kaikkien paitsi yhden ja V_{p7} kaikkien paitsi viiden puun osalta.

Keskihajonnat prosentuaalisen virheen osalta olivat 4,1 % ja 4,6 % välillä ja 7,4 litran ja 14,4 litran välillä tilavuuden osalta. Kaavat V_{p5} – V_{p8} ovat siis erittäin selvästi kaavoja V_{p1} – V_{p4} tarkempia. Pienimmän prosentuaalisen vaihtelun näistä kaavoista antoivat kaavat V_{p6} ja V_{p8} (4,1 % ja 4,2 %), jotka antoivat johdonmukaisesti liian suuria tilavuuksia. Tilavuuden keskihajonta oli pienin kaavoissa V_{p5} ja V_{p7} (8,3 l ja 7,4 l). Tilavuuden eroissa korostuvat luonnollisesti isommat puut. Kaavoissa V_{p5} ja V_{p7} käytettiin kaikkien puiden dataa ja kaavoissa V_{p6} ja V_{p8} vain puiden 12–15 dataa.

Näiden lisäksi koko puun tilavuus laskettiin runkokäyrän pyörähdystilavuuden avulla (V_{p9}). Tämä kaava antoi prosentuaaliseksi keskihajonnaksi 4,6 %, ja tilavuuden keskihajonnaksi 7,4 l.

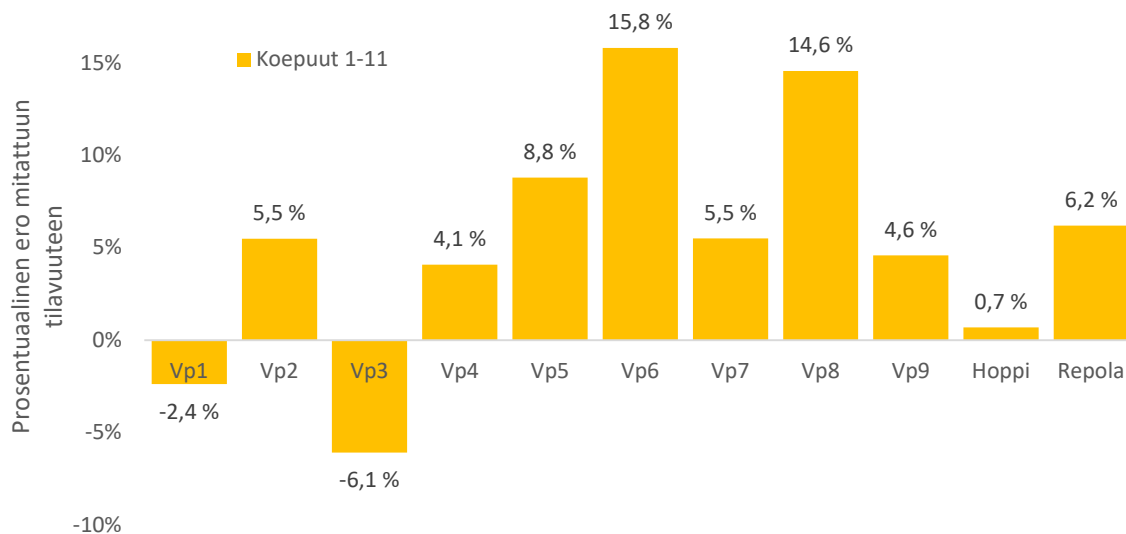
Vastaavat lukemat Hoppin ja Repolan kaavoilla olivat prosentuaalisen keskihajonnan osalta 5,7 % ja 12,7 % ja tilavuuden keskihajonnan osalta 10,7 l ja 9,4 l.

Kun lasketaan kaikkien koepuiden yhteenlaskettu tilavuus ja verrataan niitä keskenään, korostuu kaavojen V_{p6} ja V_{p8} systemaattinen tilavuuksien yliarviointi. Selvästi tarkimmiksi osoittautuivat kaavat V_{p9} ja V_{p9} sekä Repolan kaava. Erot esitetty kuvassa (Kuva 34).



Kuva 34. Kaikkien koepuiden yhteenlaskettujen tilavuuksien prosentuaalinen ero verrattuna mitattuun tilavuuteen.

Kun lasketaan koepuiden 1–11 yhteenlaskettu tilavuus ja verrataan niitä keskenään, korostuu Hoppin kaavan tarkkuus. Erot esitetty kuvassa (Kuva 35). Tämä johtunee niin sanotusta ylisovittamisesta, joka tietysti voi päteä myös tässä työssä laskettuihin malleihin yllä olevan kuvan (Kuva 34) perusteella.



Kuva 35. Koepuiden 1–11 yhteenlaskettujen tilavuuksien prosentuaalinen ero verrattuna mitattuun tilavuuteen.

4.7. Tiheydet

Tiheyttä tarkasteltaessa päädyttiin jättämään huomioita koepuiden 1–12 tulokset, koska ensimmäisen aineiston koepuiden 1–11 osalta kaikki upotusmittausdata oli vääristynyttä ja toisen aineiston koepuun 12 data oli selkeästi erilaista kuin koepuiden 13–15.

Rajallisen aineiston perusteella voidaan tehdä vain alustavia huomioita siitä, että rungon osalta puun tiheys kasvaa kuin rungon läpimitta pienenee. Oksien osalta tiheys käyttäytyy samansuuntaisesti ja oksien tiheys on ylipäättään suurempi kuin rungon. Tämä on linjassa muiden tutkimusten antamien tietojen kanssa (Hakkila 1979, 1991).

Jos tiheys ja sen muuttuminen rungon läpimitan suhteen lisättäisiin tilavuusmalleihin, saataisiin puun massamalli. Tätä työtä ei laajennettu siihen.

4.8. Koko puun biomassa

Tilavuusmallit ja puun tiheys yhdistämällä saadaan biomassamallit, kuten luvussa 3.12. esitettiin. Tässä niiden tuloksia ei laskettu tai arvioitu, koska vertailukelpoisia ja luotettavia rungon ja oksien tiheyksiä ei ole kuin kolmesta koepuusta.

Biomassamallia voidaan edelleen tarkentaa kuvaamalla tiheys rungonosan läpimitaan suhteutettuna, eikä vain kiinteitä rungon ja oksien tiheyksiä käyttämällä.

4.9. Virhelähteet

Tutkimuksen mahdollisia virhelähteitä ovat eri mittaustavat, mittausvirheet, vääristynyt otos, verrokkien erot ja virheiden kertautuminen.

Tutkimuksessa käytettiin kahta eri aineistoa ja mittaajina toimivat eri henkilöt eri aineistoissa. Tämän takia mittauksissa voi olla systemaattisia eroja toteutetun mittaustavan takia. Mittaukset pyrittiin tekemään mahdollisimman yhteneväisesti ja mittausten yksinkertaisuuden takia tästä johtuvat virheet manuaalisissa mittauksissa ovat epätodennäköisiä.

Toinen mahdollinen virhelähde ovat mittausvirheet. Niitä voi syntyä luettaessa tai kirjatessa lukemat väärin, mitattaessa väärästä kohdasta tai väärin (esim. mittauslaite vinoissa). Manuaalisissa mittauksissa nämä ovat melko epätodennäköisiä ja räikeät virheet huomattiin dataa käsiteltäessä.

Upotusmittauksissa käytettävä laite voi antaa virheellisiä tuloksia. Ensimmäisessä ja toisessa aineistossa käytettiin eri mittalaitetta. Ensimmäisen aineiston osalta upotusmittaus-tulokset hylättiin niiden epäloogisuuden takia (Hoppi 2018) ja niitä käytettiin vain oksien suhteellisuuden osalta (jolloin absoluuttisilla tuloksilla ei ollut merkitystä, vaan ratkaisevaa oli suhteelliset erot).

Tutkimuksessa käytetty aineisto oli varsin suppea ja sen osalta otoksen vääristymät näkyvät suoraan tuloksissa. Tämä tulee hyvin esiin, kun verrataan Hoppin (2018) tuloksia tässä tutkimuksessa saatuihin tuloksiin ja verrokkimalliin, jossa huomataan, että mallit toimivat parhaiten oman aineistonsa kanssa, joka on nähtävissä aiemmissa kuvissa (Kuva 34 ja Kuva 35). Hoppin aineistossa oli vain yksi isompi puu ja Hoppin malli antoi sille tarkemman tuloksen, kuin mikään muu malli, mutta toisen aineiston isoissa puissa sama malli suoriutui selkeästi verrokkeja heikommin.

Tässä tutkimuksessa käytettiin vain hieskoivuja ja verrokkina olevassa (Repola 2008) mallissa aineisto oli hies- ja rauduskoivuja. Lisäksi sekä verrokki että Hoppin mallit antavat tuloksen koko puun maanpäällisestä tilavuudesta tai massasta kantoineen ja tässä tutkimuksessa ei kantoa mallinnettu.

Myös tutkimuksessa käytetty mallinnustapa, jossa kerrotaan erilaisia malleja voi aiheuttaa virheiden kertautumista. Tämän mahdollinen suuruus vaihtelee mallien V_{p1} – V_{p8} välillä riippuen kaavan sisällöstä.

4.10. Jatkotutkimustarpeet

Mallia voitaisiin kehittää ottamalla mukaan lisää selittäviä tekijöitä, esimerkiksi latvusraja, rungon käyttäytyminen latvusrajassa, rungon muodon tarkempi huomioiminen ja oksien pohjapinta-alan ja rungon pohjapinta-alan muutokset. Tarkempi biomassamalli saataisiin yhdistämällä tilavuusmalleihin hienojakoisemmat tiheysmallit. Jatkotutkimustarpeissa olisi huomioitava niistä saatava lisäarvo ja mahdolliset käyttökohteet.

Mallia tulisi testata eri aineistolla, jotta sen soveltuvuus yleisemmällä tasolla saataisiin selville.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä luotiin omat runkokäyrä-, tilavuus- ja biomassamallit ja niitä vertailtiin aiemmin tehtyihin malleihin soveltuvin osin. Tilavuus- ja biomassamalleja tehtiin rungolle, oksille ja koko puulle. Tehtyjä runkokäyriä hyödynnettiin tilavuuden laskemisessa eri tavoin ja niitä voidaan hyödyntää, kun halutaan tietää tietyn rungonkohdan läpimitta. Puun runkokäyrä voidaan luoda, kunhan vain tiedetään puun rungon läpimitta jollain tietyllä suhteellisella korkeudella.

Tässä työssä tehdyt mallit poikkeavat aikaisemmin tehdyistä malleista kumulatiivisen lähestymistapansa ansiosta. Lisäksi vain hieskoivulle tehtyjä malleja on vain Hoppin malli (Hoppi 2018). Kumulatiivinen lähestymistapa mahdollistaa tilavuuden (tai biomassan) laskemisen mille tahansa puun suhteellisen korkeuksien osalle, jota muut jo olemassa olevat mallit eivät tarjoa. Muut mallit antavat tuloksena ulos vain koko puun (tai rungon, riippuu mallista) tilavuuden tai massan.

Tutkimuksessa tehdyt mallit vertautuvat hyvin muihin aiemmin tehtyihin malleihin. Saadut runkokäyrämallit ovat hyvin samansuuntaisia aiempiin runkokäyrämalleihin verrattuna, kun huomioidaan, että tässä ei mallinnettu rungon tyveä aivan maan pintaan asti eli kanto jätettiin mallintamatta. Tutkimus vahvistaa, että hyvinkin pienellä koepuumäärällä voidaan laskea suhteellisen tarkat runkokäyrät.

Yhdeksästä tilavuusmallista parhaat antavat myös hyvin samanlaisia tuloksia kuin vertailumallit. Tulosten tarkkuus riippuu hieman tarkastelunäkökulmasta, tarkastellaanko yksittäistä puuta vai puujoukkoa. Huomionarvoista tuloksissa on myös se, että kun huomioitiin vain puun pituus, niin parhaat mallit saatiin hyödyntämällä vain koepuiden 12–15 tietoja. Kun pituuden lisäksi huomioitiin myös läpimitta, niin vain koepuita 12–15 hyödyntävät mallit antoivat liian suuria tuloksia.

Oksien ja tiheyden mallintamisen osalta mallit ovat epävarmemmalla pohjalla kuin muut, koska niissä käytettävien datapisteiden määrä oli hyvin rajallinen johtuen, että käytössä oli vain pääasiassa koepuiden 12–15 tiedot.

Pienen koepuumäärän ja vertailupuuston puutteen takia mallin todellista tarkkuutta ja sen yleistettävyyttä ei suoraan pystytä arvioimaan, mutta suuntaa antavat vertailu Repolan (2008) paljon suuremmilla koepuumäärillä tehtyyn malliin. Hoppin (2018) mallin tarkastelu koepuiden 12–15 suhteen kuvaa pienen koepuumäärän ongelmia, joita käsiteltiin aiemmin luvussa 4.9.

Vertailu muihin malleihin kuitenkin osoittaa, että hyvin rajallisella koepuumäärällä voidaan luoda mallit, jotka toimivat vähintään paikallistasolla hyvin ja Repolan kaavasta saatujen vertailutulosten perusteella myös niiden yleistettävyys on ainakin kohtuullisella tasolla. Lähes kaikki omat mallit, kuten myös vertailumallit, antoivat välillä liian suuria arvoja ja välillä liian pieniä arvoja koepuille verrattuna mitattuihin suureisiin. Tämä indikoi mallin toimivuutta ja puiden yksilöllisiä eroja. Mahdollisen ylisovittamisen ongelmia on vaikea arvioida ilman testiaineistoa.

Tulokset vahvistivat oletusta, että puiden mittasuhteet käyttäytyvät johdonmukaisesti eri kokoisilla puilla. Kuitenkin on huomioitava, että vaikka puut käyttäytyvät johdonmukaisesti, niin jokainen niistä on yksilö ja luonto ei tottele yleisiä malleja kuin tiettyyn rajaan asti. Yleiset mallit voivat puiden yksilöllisistä ominaisuuksista johtuen antaa yksittäiselle puulle todellisuudesta paljonkin poikkeavia tuloksia. Puun yksilöllisiin ominaisuuksiin vaikuttavat monet asiat, muun muassa puun kasvuolosuhteet, maaperä, kasvutila. Näitä näkökulmia ei tässä tutkimuksessa huomioitu.

Malleja voitaisiin tarkentaa lisäämällä selittävien suureiden määrää ja tätä kautta huomioida paremmin puiden yksilölliset vaihtelut. Tämä toisi mukanaan kuitenkin vaatimuksia tehdä lisämittauksia ja niiden hyödyt olisikin arvioitava tätä taustaa vasten.

Vastaavia malleja voidaan käyttää ja parhaan tuloksen voisi antaa erilaisten mallien yhdistelmä, jossa mallit kompensoisivat toistensa heikkouksia esimerkiksi yhdistämällä erilaisia kaukokartoitus- ja laserkeilausmalleja hakkuukoneen tietoihin ja tässä tutkimuksessa saatujen mallien tapaisiin malleihin.

Hieskoivun osalta suurimmat käyttökohteet ovat energiapuun mallinnus eri käyttötarkoituksissa sekä sitoutuneen ja vapautuneen hiilen määrän arviointi hiilitase ja ilmastolaskelemissa.

6. LÄHTEET

Hieskoivu, pinkka, lajintuntemuksen oppimisympäristö. 2020. [verkkojulkaisu]. Luonnontieteellinen keskusmuseo, Helsingin yliopisto. Saatavissa: <http://pinkka.helsinki.fi/pinkat/#/species-cards/35854>. [Viitattu 31.3.2020].

Hieskoivu, puuproffa. 2020. [verkkojulkaisu]. Pro Puu -keskus. Saatavissa: <https://puuproffa.fi/puutieto/yleista-puista/hieskoivu/>. [Viitattu 2.4.2020].

Rauduskoivu, puuproffa. 2020. [verkkojulkaisu]. Pro Puu -keskus. Saatavissa: <https://puuproffa.fi/puutieto/yleista-puista/rauduskoivu/>. [Viitattu 2.4.2020].

Koivu - betula pendula (betula pubescens), puuinfo. 2020. [verkkojulkaisu]. Puuinfo Oy. Saatavissa: <https://www.puuinfo.fi/puutieto/puulajit>. [Viitattu 2.4.2020].

Metsäkurjenpolvi, pinkka, lajintuntemuksen oppimisympäristö. 2020. [verkkojulkaisu]. Luonnontieteellinen keskusmuseo, Helsingin yliopisto. Saatavissa: <http://pinkka.helsinki.fi/pinkat/#/speciescards/42948>. [Viitattu 31.3.2020].

Koivu, yleisin lehtipuulajimme, on taipuisa terveyspommi. 2019. (11.3.2019).

Laki puutavaran mittauksesta (14.6.2013/414). 2013.

Anttila, P. 2018. Regional balance of forest chip supply and demand in Finland in 2030. *Silva Fennica* 52(2).

Appelroth, E., Heikinheimo, O., Kalela, E., Laitakari, E., Lindfors, J. & Sarvas, R. 1948. Julkiläusuma. *Metsätaloudellinen aikakauslehti* (11): 315–316.

Asikainen, A. & Anttila, P. 2013. Riittääkö metsähake? *Metsätieteen aikakauskirja* (4): 685–688.

Hakkila, P. 1991. Hakkuupoistuman latvusmassa. *Metsäntutkimuslaitos, Helsinki*. 24 sivua.

Hakkila, P. 1979. Wood density survey and dry weight tables for pine, spruce and birch stems in Finland [pinus sylvestris, picea abies, betula pendula, betula pubescens]. *Metsäntutkimuslaitoksen Julkaisuja* (no): 1–59.

Heikura, P. & Kumpula, K. 2016. Lehtipuiden nimet ovat vanhaa perua. *Yle*.

Heräjärvi, H. 2001. Technical properties of mature birch (betula pendula and B. pubescens) for saw milling in Finland. *Silva Fennica* 35(2001): 469–485.

Hoppi, A. 2018. Hieskoivun (Betula pubescens) biomassamallien laadinta.

Ilvessalo, Y. 1947. Pystypuiden kuutioimistaulukot. *Metsätieteellinen tutkimuslaitos, Helsinki*. 149 sivua.

Järvinen, L. 2012. Puulajit. *Suomen metsäyhdistys, Helsinki: Punkaharju*. 1 verkkoineisto (44 sivua).

Kärkkäinen, L. 2005. Evaluation of performance of tree-level biomass models for forestry modeling and analyses. Metla, Joensuun tutkimuskeskus, Joensuu. 123 sivua.

Kärkkäinen, L. & Härkönen, K. 2005. Biomassamallit ja niiden käyttö. Julkaisussa: Kettunen, L. & Nuutinen, T. (toim.). MELA2005 ja nettisovellukset. Metlan työraportteja 15. Metla, Helsinki. s. 65.

Kauhanen, E. 2008. Kaikki mitä olet aina halunnut tietää koivusta. Metsäntutkimus (4): 30.

Korhonen, K. T., Ahola, A., Heikkinen, J., Henttonen, H. M., Hotanen, J., Ihalainen, A. et al. 2017. Suomen metsät 2009–2013 ja niiden kehitys 1921–2013. Luonnonvarakeskus, Helsinki. 1 verkkoaineisto (35 sivua).

Koski, V. 2009. Jyrki Raulo. Helsingin Sanomat Muistot:(29.1.2009).

Laasasenaho, J., Waite, M. & Karttunen, H. 2002. Efficient modelling of stem curves. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja (860).

Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch [*pinus sylvestris*, *picea abies*, *betula pendula*, *betula pubescens*].

– 1996. Metsän mittaus ja kartoitus, MARV1 -luentomoniste. Helsingin yliopisto, Metsävarojen käytön laitos.

Lahti, J., Lauhanen, R., Laasasenaho, J., Timonen, R. & Kitinoja, A. 2018. Onko tuoreen puun poltosta hyötyä maatilametsänomistajalle? Tuoreen energiarangan hankintalogistiikan ja polton kehittäminen. Julkaisussa: Puhakainen, T. & Hakojärvi, M. (toim.) Suomen maataloustieteellisen seuran tiedote no 34. Maataloustieteen päivät 2018.

Lahtinen, A. & Laasasenaho, J. 1980. On the construction of taper curves by using spline functions. [Metsäntutkimuslaitos], Helsinki. 63 sivua.

Lampinen, R., Lahti, T. 2019. Kasviatlas 2018.

Lehtonen, M. 2016. Hiestä vai raudusta vihtaan?

Liimatainen. 1970. Miten metsään huutaa. Suomen kuvalehti (20/2):

Lönnroth, E. 1927. Über Stammkubierungsformeln.

Luonnonvarakeskus. 2017. Luonnonvarakeskuksen määräys puutavaran mittaukseen liittyvistä yleisistä muuntoluvuista.

Maa- ja metsätalousministeriö. 2013. Maa- ja metsätalousministeriön asetus puutavaran mittauksen mittausmenetelmäryhmien ja mittausmenetelmien tarkemmasta sisällöstä sekä mittauslaitteiden käytöstä (17.6.2013 1323/14/2013).

Marklund, L. G. 1988. Biomassfunktioner för tall, gran och björk i Sverige. Swedish University of Agricultural Sciences 45:1–73.

Melkas, T., Hämäläinen, J. 2015. Hakkuukoneella kerätyn puustotiedon hyödyntäminen. Metsäteho Oy, 47 s.

Melkas, T. 2018. Mittaus ja laatu -opas. Metsätehon oppaat.

Niemistö, P. 2012. Harventamaton hieskoivikko - edullinen energiapuureservi? Bioenergia: tuotanto, tekniikka, ympäristö (2): 8–10.

Niemistö, P., Kojola, S., Ahtikoski, A. & Laiho, R. 2017. Tiheiköt hyötykäyttöön? - hieskoivikoiden kasvatusvaihtoehtojen kannattavuus turvemilla. Metsätieteen aikakauskirja 4. [Verkkojulkaisu] Finna.

Nurmi, J. 2014. Changes in volumetric energy densities during storage of whole-tree feed stocks from silvicultural thinnings. Biomass and Bioenergy 61:114–120.

– 1997. Heating values of mature trees.

Nyyssönen, A. 1959. Metsänarvioimistieteellinen tutkimus Suomessa vuosina 1909–1959.

Pohjonen, V. 2016. Hieskoivu oli metsiemme hukkakaura. Uusi Suomi Puheenvuoro:(6.3.2016).

Repola, J. 2009. Biomass equations for scots pine and norway spruce in Finland. Silva Fennica 43(4): 625–647.

– 2008. Biomass equations for birch in Finland. Silva Fennica 42(4): 605–624.

Repola, J., Laitila, J. & Lindblad, J. 2011. Latvusmassan ja kantopuun määrän arviointi hakkuukonemittauksessa. Metla, Vantaa. 1 verkkoaineisto (21 sivua).

Ronkainen, P., Sirkiä, S. & Lindblad, J. 2014. Harvennusenergiapuun ja latvusmassan kosteuden määrittäminen metsäkuljetuksessa. Metsätieteen aikakauskirja 4/2014: 211–228. Saatavissa: <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff14/ff144211.pdf>.

Tahvanainen, T. 2008. Individual tree models for the crown biomass distribution of scots pine, norway spruce and birch in Finland. Forest Ecology and Management 255(3): 455–467.

Torppala, V. 2017-12-11. Puun tilavuuden mittauslaitteen kehittäminen; Development of a tree volume measuring instrument. 51 + 8 s.

Uotila, A. 2020. MMT Antti Uotila, Hyytiälän metsäaseman johtaja, Helsingin yliopisto. Keskustelu 20.3.2020.

Vaahtera, E. 2020. Puuston biomassa metsä- ja kitumaalla (milj. t). Luonnonvarakeskus, tilastotietokanta:(VMI 12 (2014–2018)).

Väre, H. & Kiuru, H. 2013. Suomen puut ja pensaat. 2. painos. Metsäkustannus Oy, 249 s.

Verkasalo, E. 1997. Hieskoivun laatu vaneripuuna. Metsäntutkimuslaitos, Joensuu. 483 sivua.

Vuokila, Y. 1960. Lehtikuusen kuutioimisytälöt ja -taulukot. Metsäntutkimuslaitos, Helsinki. 89 sivua.

Vuokko, S. 2005. Metsien yleiset kasvit. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio, Helsinki. 160 s.

Ylitalo, E. 2019. Metsäteollisuuden puunkäyttö 2018. Luonnonvarakeskus, tilastotietokanta.

7. LIITTEET

Liite 1. Koepuiden runkojen mittauslomake (Hoppi 2018)

Koepuun nro	
Kaatopäivämäärä	
Pituus [m]	
Ensimmäinen kuollut oksa [m]	
Elävän latvuksen raja [m]	
Kasvupaikkatyyppi	
Puun ikä	

Työvälineiden lyhenteet ja niiden paksuudet

MS Moottorisaha 8 mm
 PS Pokasaha 2 mm
 OS Oksasaha 1mm
 OL Oksaleikkurit
 0 mm

Huomioita:

Läpimitta osavälin tyvipuolelta	d 1	d 2	d 3	d 4	d 5	d 6	d 7	d 8	d 9	d 10	d 11	d 12	d 13	d 14	d 15
Katkaisuun käytetty työväline	MS														
Mittauskorkeus [m]	0														
d _{p-e} [mm]															
d _{i-l} [mm]															
Massa, g															
Kuoren paksuus	b 1	b 2	b 3	b 4	b 5	b 6	b 7	b 8	b 9	b 10	b 11	b 12	b 13	b 14	b 15
b _p [mm]															
b _e [mm]															

Läpimitta osavälin tyvipuolelta	d 16	d 17	d 18	d 19	d 20	d 21	d 22	d 23	d 24	d 25	d 26	d 27	d 28	d 29	d 30
Katkaisuun käytetty työväline															
Mittauskorkeus [m]															
d _{p-e} [mm]															
d _{i-l} [mm]															
Massa, g															

Liite 2. Koepuiden oksien mittauslomake (Hoppi 2018)

Koepuun nro		
Oksan tila	elävä = 1	kuollut = 2

Oksan nro	Osaväli	Etäisyys tyveltä [cm]	Irrotukseen käytetty työväline	d _{tan} [mm]	d _{säde} [mm]	Oksan pituus [cm]	b _{tan.} [mm]	b _{säde} [mm]	Tila	Osavälin oksien massa, g
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										